



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

PEKKA NUUTINEN
LISÄTYN TODELLISUUDEN HYÖDYNTÄMINEN
SUUNNITTELUKATSELMOINNISSA

Diplomityö

Tarkastajat: professori Asko
Riitahuhta ja tutkimusjohtaja Petteri
Multanen
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Automaatio-, kone- ja
materiaalitekniikan
tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 8. joulukuuta 2010

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

NUUTINEN, PEKKA: Lisätyn todellisuuden hyödyntäminen

suunnittelukatselmoinnissa

Diplomityö, 60 sivua, 1 liitesivu

Helmikuu 2011

Pääaine: Tuotekehitys

Tarkastajat: professori Asko Riitahuhta ja tutkimusjohtaja Petteri Multanen

Avainsanat: lisätty todellisuus, suunnittelukatselmointi, tuotekehitys,

virtuaalitodellisuus, virtuaaliympäristö

Globaali kilpailu on aiheuttanut suuria paineita koneiden ja laitteiden tuotekehityksen nopeutumiselle. Samalla tuotteisiin kohdistuvat vaatimukset lisääntyvät, jolloin tuotteeseen vaikuttavista asioista on yhä tärkeämpää saavuttaa mahdollisimman korkea ymmärrys entistä nopeammin. Yksi tehokkaimmista tavoista ymmärryksen lisäämiseksi ja nopeuttamiseksi on visuaalisuuden lisääminen tuotekehitysprosessin eri vaiheissa. Tämän työn tavoitteena on selvittää miten lisättyä todellisuutta voidaan hyödyntää suunnittelukatselmoinnissa.

Työ jakautuu teoria- ja sovellusosuuteen. Teoriaosuudessa esitellään lisätyn todellisuuden perusteet ja teknologian kytkeytyminen tuotekehitysprosessiin. Samalla rakennetaan kuva siitä, mihin lisättyä todellisuutta on tähän mennessä sovellettu, ja mitä mahdollisuuksia teknologia tarjoaa suunnittelukatselmointien ja tuotekehityksen tueksi. Sovellusosuudessa selostetaan konstruktiiiviseen tapaustutkimukseen ja käyttäjähaastatteluihin pohjautuen mitä vaatimuksia ja hyötyjä lisätyn todellisuuden hyödyntäminen asettaa. Lisäksi selvitetään voidaanko sovelluksia toteuttaa kaupallisilla ohjelmilla edullisesti ja laadukkaasti ilman ohjelmointitaitoa sekä millaista lisäarvoa toteutus tarjoaa perinteiseen katselmointiin verrattuna. Lopussa tapaustutkimuksessa toteutettuja sovelluksia vertaillaan suorituskkyisellä laitteistolla toteutettuun sovellukseen.

Tutkimus osoittaa, että lisätyn todellisuuden avulla voidaan parantaa visualisointia ja luoda realistisempi vuorovaikutus suunniteltavan tuotteen ja suunnittelijoiden välille. Lisätyn todellisuuden teknologia mahdollistaa todellisen kokoisen virtuaalimallin visualisoimisen nopeasti lähes minne tahansa. Työssä esitetyt sovellukset on helposti kopioitavissa ja siirrettävissä myös tutkimusympäristön ulkopuolelle, koska ne ovat toteutettu poikkeuksellisesti kaupallisilla ohjelmilla ilman vaatimusta ohjelmointiosaamisesta. Tämän ansiosta pienet teknologiaa tuntevat yritykset voivat ottaa käyttöönsä virtuaaliympäristöjen ominaisuuksia, jotka ovat korkeiden kustannusten takia olleet perinteisesti vain suurten yritysten ulottuvilla. Yritysten pitäisikin hyödyntää rohkeasti lisätyn todellisuuden tarjoamia mahdollisuuksia. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että lisättyä todellisuutta voidaan hyödyntää suunnittelukatselmoinneissa aikaisempaa edullisemmin kokonaisvaltaisemman ymmärryksen ja laadukkaampien tuotteiden saavuttamiseksi.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

NUUTINEN, PEKKA: Augmented Reality in Design Review

Master of Science Thesis, 60 pages, 1 Appendix page

February 2011

Major: Product Development

Examiners: Professor Asko Riitahuhta and Research Director Petteri Multanen

Keywords: augmented reality, mixed reality, design review, planning inspection, product development, virtual reality, virtual environment

The global competition has caused lot of pressure to the acceleration of the product development of the machines and devices. Furthermore, the demands which are directed to the products increase. Hence, it is more important to reach as high understanding as possible and faster than before from the requirements of a product. One of the most efficient ways getting better understanding faster is to improve visualization in the product development process. The objective of this work is to clarify how the augmented reality can be utilized in design review.

The work is divided into the theory and application part. In the theory part the grounds of the augmented reality and the connecting of the technology with the product development process are presented. At the same time a picture is built of where the augmented reality has been adapted so far and what opportunities the technology provides to support the design reviews and product development. In the application part it is explained to a constructive case study and to user interview based what demands and advantages the utilizing of the augmented reality sets. Furthermore, it is clarified if good quality augmented reality application is possible to create with commercial software without programming skills. The applications are also compared with applications that have been carried out with efficient equipment.

The study shows that the augmented reality can be used to improve visualization and to create more realistic interaction between the product and the designers. Augmented reality technology makes the visualizing of a real size virtual model possible almost anywhere. The applications that have been presented in the work can be copied easily outside the study environment and can be moved because they are executed exceptionally on commercial software without the demand for the programming know-how. Thanks to this, the small technology companies can utilize the augmented reality to reach the properties of the virtual environments which have been traditionally only within the reach of big companies because of high costs. The companies indeed should courageously utilize the possibilities offered by the augmented reality. As a conclusion it is stated that the augmented reality can be utilized more advantageously than before in the design reviews to reach a more comprehensive understanding and more high-quality products.

ALKUSANAT

Tämä on Tampereen teknillisen yliopiston konetekniikan koulutusohjelmassa suoritettu diplomi-insinöörin tutkintoon kuuluva opinnäytetyö. Diplomityö tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston Hydraulikan ja automatiikan laitoksella ManuVAR EU-projektiin liittyen. Työn tavoitteena oli selvittää lisätyn todellisuuden hyödynnettävyyttä suunnittelukatselmointien tukemiseksi ja kehittämiseksi.

Suurimmat kiitokset haluan esittää työn tarkastajina ja ohjaajina toimineille Asko Riitahuhdalle ja Petteri Multaselle. Kuukausittaisten palavereiden ja hyvien kommenttien ansiosta työ valmistui yllättävän helposti ja nopeasti. Lisäksi haluan kiittää työtovereita työn aihepiiriin liittyvistä keskusteluista ja mukavasta työilmapiiristä.

Opiskelukavereita ja ystäviä haluan kiittää koko opiskeluajasta ja siihen liittyvistä ikimuistoisista elämyksistä. Lopuksi haluan kiittää vanhempiani ja avovaimoani Teijaa työn tekemiseen ja koko opiskeluaikaan kohdistuneesta tuesta.

Tampereella 4.2.2011

Pekka Nuutinen

SISÄLLYS

1.	Johdanto.....	1
2.	Lisätty todellisuus	3
2.1.	Perusteet.....	3
2.1.1.	Lisätyn todellisuuden elementit.....	4
2.1.2.	Virtuaalitodellisuuden sisartechnologia	5
2.1.3.	Nouseva teknologia	6
2.2.	Visualisointi	7
2.2.1.	Päähän kiinnitettävät näyttölaitteet.....	7
2.2.2.	Kädessä pidettävät näyttölaitteet	9
2.2.3.	Paikallaan pysyvät näyttölaitteet	9
2.3.	Paikannus	10
2.3.1.	Markkeripohjainen menetelmä.....	10
2.3.2.	Piirrepohjainen menetelmä	11
2.3.3.	Kalliimmat menetelmät.....	12
2.4.	Muu laitteisto	13
2.4.1.	Kamera.....	13
2.4.2.	Tietokone	14
2.5.	Ohjelmat.....	14
2.5.1.	3DVIA Virtools.....	14
2.5.2.	Unifeye Design.....	16
2.5.3.	AR-ohjelmakirjastot	17
2.6.	Esimerkki suorituskyykyisestä laitteistosta	18
3.	Lisätty todellisuus suunnittelussa	20
3.1.	Tuotekehitysprosessi	20
3.1.1.	Suunnittelukatselmoinnit ja lisätty todellisuus.....	22
3.2.	Aiheeseen liittyvä tutkimus.....	23
3.2.1.	AR-tutkimuksen historiaa	23
3.2.2.	ManuVAR-projekti.....	24
3.2.3.	Tutkimus Suomessa	25
3.2.4.	Tutkimus maailmalla	26
3.3.	AR-sovelluksia	27
3.3.1.	Sovellus suunnittelukatselmointien tueksi.....	27
3.3.2.	Lisätty todellisuus tehdassuunnittelussa	28
3.3.3.	Käytettävyytestaus AR:n avulla.....	29
3.3.4.	Hydrauliikkalohkon kokoonpano	29
3.3.5.	Sormet osoittimena	30
3.4.	AR-katselmointi suorituskyykyisellä laitteistolla	31
3.5.	Teoriaosuuden johtopäätökset.....	32

4.	Edullinen AR-katselmointi	34
4.1.	Tavoite	34
4.2.	Laitteisto ja ohjelmat	35
4.2.1.	Visualisointi	35
4.2.2.	Paikannus	36
4.2.3.	Ohjelmat	37
4.2.4.	Tietokone	38
4.3.	AR-katselmointi	39
4.3.1.	Ohjausyksiköiden sijoittelu	39
4.3.2.	Visualisointiympäristö	40
4.4.	Toteutus	41
4.4.1.	Kameran kalibrointi	42
4.4.2.	Markkerien toteutus	42
4.4.3.	Sovellusten toiminnallisuus	43
4.4.4.	Ajankäyttö	44
5.	Tulokset ja niiden tarkastelu	46
5.1.	Vaatimukset edullisen AR-katselmoinnin toteuttamiseksi	46
5.2.	Käyttäjäkokeemukset AR-katselmoinnista	47
5.3.	Vertailu vaihtoehtoihin menetelmiin	48
5.3.1.	Perinteinen katselmointi	48
5.3.2.	AR-katselmointi suorituskykyisellä laitteistolla	49
5.4.	Lisätyn todellisuuden tarjoama hyöty	49
5.5.	Tulosten tarkastelu	50
5.6.	Tulevaisuus	51
5.6.1.	Edullisten paikannusmenetelmien kehitys	51
5.6.2.	Kannettavat laitteet	52
6.	Johtopäätökset	53
	Lähteet	55
	Liite 1: Haastattelulomake	61

TERMIT JA LYHENTEET

3D	Kolmiulotteinen (engl. Three Dimensional).
AR	Lisätty todellisuus (engl. Augmented Reality).
CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu (engl. Computer Aided Design).
CAD-malli	CAD-ohjelmassa tehty kolmiulotteinen malli tuotteen rakenteesta.
HMD	Päähän kiinnitettävä näyttölaite (engl. Head-Mounted Display).
LCD	Nestekidenäyttö (engl. Liquid Crystal Display).
Markkeri	Kuvio, jonka perusteella tietokoneohjelma voi laskea paikkatiedon.
Markkerikenttä	Useasta markkerista koostuva kokonaisuus.
MR	Yhdistetty todellisuus (engl. Mixed Reality).
PDM	Tuotetiedon hallinta (engl. Product Data Management).
PLM	Tuotteen elinkaaren hallinta (engl. Product Lifecycle Management).
Resoluutio	Kertoo näytössä olevien kuvapisteen määrän. Ilmaistaan useimmiten muodossa: vaakasuunta x pystysuunta.
Suunnittelukatselmointi	Tuotekehitysprosessissa käytetty ryhmätyömenetelmä, jossa vähintään kaksi henkilöä tarkastelee suunnitelmia esimerkiksi huollettavuuden tai kokoonpantavuuden näkökulmasta.
Tuotteen elinkaari	Tuotetta kuvaava elinkaari, joka alkaa suunnitteluvaiheesta vaatimuksia ja ominaisuuksia määriteltäessä ja loppuu tuotteen poistovaiheeseen (engl. Product lifecycle).
Virtuaalimalli	Virtuaalitodellisuudessa tai lisätyssä todellisuudessa käytetty kolmiulotteinen malli tuotteesta.
Virtuaaliympäristö	Sisältää virtuaalitodellisuuden toteuttamiseen vaadittavan laitteiston ja virtuaalitodellisuuden.
VR	Virtuaalitodellisuus (engl. Virtual Reality).
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

1. JOHDANTO

Globaali kilpailu on aiheuttanut koneiden ja laitteiden tuotekehityssykliden nopeutumisen ympäri maailman. Samaan aikaan vaatimukset lisääntyvät, jonka johdosta tuotteista tulee usein entistä monimutkaisempia. Näin ollen tuotteeseen vaikuttavista asioista on yhä tärkeämpää saavuttaa mahdollisimman korkea ymmärrys entistä nopeammin tuotekehityksen eri vaiheissa. Ymmärryksen tulisi kattaa mahdollisimman laajasti koko tuotteen elinkaari niin yksilö- kuin ryhmätasolla. Yksi tehokkaimmista tavoista ymmärryksen lisäämiseksi ja nopeuttamiseksi on visuaalisuuden parantaminen tuotekehityksen aikana.

Suurissa yrityksissä virtuaaliympäristöt ovat tuoneet osittaisen ratkaisun ongelmaan. Laitteistot ovat kuitenkin kalliita ja monimutkaisia kokonaisuuksia, joiden käyttöönottoon pienillä yrityksillä ei ole realistisia mahdollisuuksia. Tyypillinen ratkaisu onkin pitää suunnittelukatselmoiteja, joissa 3D CAD -malli heijastetaan projektorikankaalle ja katselmoinnin osallistujat seuraavat visualisointia omilta paikoiltaan (Santos et al. 2007). Lisätyn todellisuuden (Augmented Reality, AR) avulla katselmointiin voidaan lisätä virtuaaliympäristöistä tuttuja ominaisuuksia aikaisempaa edullisemmin. Esimerkiksi todellisessa koossa oleva 3D-malli voidaan tuoda projektorikankaalta kokoustilaan, jolloin osallistujat pääsevät liikkumaan mallin ympärillä ja katselmointi voidaan toteuttaa luonnollisemmin.

Tämän työn tavoitteena on tutkia mitä vaatimuksia ja hyötyjä edellä kuvatun tilanteen toteuttaminen asettaa. Tavoitteena on ensinnäkin selvittää voidaanko sovellus toteuttaa kaupallisilla ohjelmilla edullisesti ja laadukkaasti ilman ohjelmointitaitoa. Lisäksi selvitetään millaista lisäarvoa toteutus tarjoaa perinteiseen katselmointiin verrattuna ja luodaan nopea katsaus edullisen laitteiston hyödyntämismahdollisuuksista muihin tuotteen elinkaaren vaiheisiin. Lopuksi edullisen laitteiston tarjoamia ominaisuuksia vertaillaan kalliimpaan laitteistoon.

Tutkimusmenetelminä käytetään kirjallisuusselvitystä, konstruktivistista tapaustutkimusta ja haastatteluja. Kirjallisuusselvitys lähtee liikkeelle lisätyn todellisuuden perusteista ja tarvittavista laitteista, jonka jälkeen esitellään nykyisiä sovelluksia ja muutama uusi sovellusidea. Tämän jälkeen konstruktivistiseen tapaustutkimukseen pohjautuen selostetaan edullisen AR-katselmoinnin toteutus. Tulososiossa esitetään haastattelujen avulla kerätyt käyttäjäkokemukset toteutetusta AR-katselmoinnista, vertailu vaihtoehtoisiin menetelmiin ja lisätyn todellisuuden tarjoama lisähyöty. Lopussa pohditaan työn tulosten vaikuttavuutta ja sovellettavuutta laajempaan mittakaavaan.

Työ on osa kansainvälistä ManuVAR (www.manuvar.eu) EU-projektia. Projektin tavoitteena on manuaalisen työn tehostaminen koko tuotteen elinkaaren aikana virtuaali- ja lisätyn todellisuuden avulla. ManuVAR:issa on mukana kaikkiaan 18 tutkimus- ja yritysosapuolta kahdeksasta eri maasta. Projektin toteutusaika on 2009–2012 ja budjetti 9,7 miljoonaa euroa. Projektissa osapuolet muodostavat viisi ryhmää, joissa kehitetään päätavoitetta tukevia sovelluksia yhteistyössä muiden ryhmien kanssa. Tuloksena odotetaan syntyvän uusia työkaluja, tietotaitoa ja liiketoimintaa. (ManuVAR 2009.)

VTT (Valtion teknillinen tutkimuskeskus) on tehnyt jo useamman vuoden ajan huipputason tutkimusta monipuolisesti lisätyn todellisuuden alueella. He ovat kehittäneet muun muassa ALVAR-ohjelmakirjaston, jonka avulla voidaan toteuttaa entistä parempia lisätyn todellisuuden ja virtuaalitodellisuuden sovelluksia. Tutkimusta on tehty paljon myös kannettavilla laitteilla käytettävien AR-sovellusten alueella. (ALVAR 2010.) Tässä työssä toteutetut sovellukset pohjautuvat ALVAR-kirjastoon.

Kirjallisuusselvitys pohjautuu suureksi osaksi tieteellisiin julkaisuihin, koska laajempia teoksia lisäystä todellisuudesta on vähän tarjolla. Tässä työssä niin sanottuna perusteoksena on kuitenkin käytetty Hallerin et al. (2007) kokoamaa kirjaa: *Emerging Technologies of Augmented Reality: Interfaces and Design*. Se keskittyy varsinkin teollisuuteen suunniteltuihin lisätyn todellisuuden sovelluksiin ja tarjoaa hyvät perustiedot lisäystä todellisuudesta myös tähän työhön.

Lisätyn todellisuuden hyödyntämisestä suunnittelukatselmoinneissa on julkaistu muutamia artikkeleita. Esimerkiksi Uva et al. (2010) kehittivät tutkimusprojektissaan AR-sovelluksen, jonka avulla lujuuslaskennan visualisointia voidaan tarkastella suoraan todellisen kappaleen pinnalla ja kehityskommentit voidaan liittää suoraan 3D-malliin. Pentenrieder et al. (2007) kehittivät useita sovelluksia, joiden avulla voitiin tutkia vanhan tuotantolinjan soveltuvuutta uudelle automallille entistä visuaalisemmin. Klinker et al. (2002) toteuttivat autojen katselmointisovelluksen BMW:n teollisten muotoilijoiden avuksi. Tavoitteena oli tarjota apuväline teollisille muotoilijoille, jotta kehityskierroksia voitaisiin suorittaa aikaisempaa enemmän.

Vuosina 2006-2009 Suomessa toteutettiin *Augmented Assembly* -projekti, jonka tavoitteena oli tuoda lisätyn todellisuuden teknologia yksittäis- ja piensarjatuotteiden kokoonpanotyöhön, ja kehittää suunnittelu- ja valmistusprosessia tukemaan paremmin kokoonpanotyötä. Projektissa toteutettiin myös laajat käyttäjätestit traktorin työhydrauliikkakomponentin kokoonpanoa avustavalle AR-sovellukselle. (Salonen et al. 2009.)

2. LISÄTTY TODELLISUUS

Dunstonin et al. (2002) mukaan suunnitelmien visualisointi on avainasemassa kommunikaation ja yhteisen ymmärryksen saavuttamiseksi. Yhteinen ymmärrys on heidän mukaansa ratkaisevan tärkeää suunnittelukatselmoinneissa. Lisätyn todellisuuden (Augmented Reality, AR) avulla visualisointia on mahdollista parantaa ja lisätä, jolloin vaadittujen asioiden ymmärrys voidaan saavuttaa entistä varmemmin ja nopeammin.

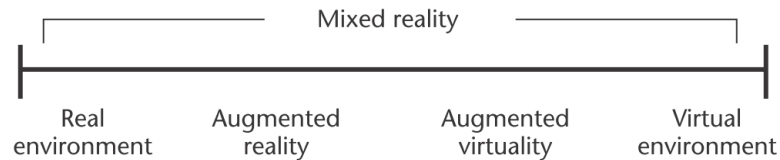
Regenbrechtin (2007) mukaan on olemassa kolme asiaa, jotka johtavat uuden teknologian käyttöönottoon teollisuudessa: kustannusten aleneminen, ajan säästyminen ja laadun paraneminen. Hänen mukaansa lisätty todellisuus kattaa kaikki kolme asiaa. Käyttöönottoa on toistaiseksi hidastanut muun muassa sovellusten laatu, toimintavarmuus ja erilaiset käytännön asiat. Selvää kuitenkin on, että lisätty todellisuus on hyvää vauhtia matkalla arvoa lisääväksi teknologiaksi myös teollisuuden tarpeisiin. (Regenbrecht 2007.)

Lisätyn todellisuuden avulla virtuaalitodellisuudesta tuttuja hyötyjä voidaan toteuttaa aikaisempaa edullisemmin. Tämä luku muodostaa kuvan siitä mitä lisätty todellisuus tarkoittaa ja mitä sovellusten toteuttaminen vaatii. Luku valaisee myös lisätyn todellisuuden rajoja ja kustannustasoa laitteiden ja ohjelmien avulla.

2.1. Perusteet

Lisätty todellisuus on todellisen ympäristön ja virtuaalitodellisuuden (Virtual Reality, VR) yhdistelmä. Teknologia kehittyi 1990-luvulla virtuaalitodellisuuden sisarteknologiana. (Salonen et al. 2009.) Yleisesti AR:n historian katsotaan alkaneen jo vuonna 1965, kun Ivan Sutherland hahmotteli ensimmäisen silmikkonäytön (Head Mounted Display, HMD) (Sutherland 1965). Kehitys nopeutui 1990-luvulla, kun tarvittava tekniikka muuttui tehokkaammaksi, kevyemmäksi ja pienemmäksi tietokoneiden ja valmistusmenetelmien kehittyessä.

Samalla vuosikymmenellä Milgram ja Kishino (1994) määrittelivät todellisuus-virtuaalisuus-jatkumon (”virtuality continuum”), jossa lisätty todellisuus sijoitettiin todellisen ympäristön ja virtuaalitodellisuuden välille (kuva 1). Mixed Reality -termi kattaa koko jatkumon päätepisteitä lukuun ottamatta ja Augmented Virtuality -termi sijoittuu lisätyn todellisuuden ja virtuaalitodellisuuden väliin. Tämän lisäksi he sitoivat termit tiettyihin visualisointitekniikoihin.



Kuva 1. Todellisuus-virtuaalisuus-jatkumo. (Milgram & Kishino 1994, Azuma et al. 2001 mukaan)

Muutamaa vuotta myöhemmin Azuma (1997) esitti kolmen kohdan teknologiariippumattoman määritelmän, jonka mukaan lisätty todellisuus yhdistää todellista ja virtuaalista, on interaktiivinen reaaliajassa ja havaitaan kolmiulotteisena. Yksinkertaiseen sovellukseen riittää siis videokuva todellisesta ympäristöstä ja sen päälle lisätty kolmiulotteinen virtuaalimalli, jonka paikka päivittyy tarpeeksi nopeasti.

2.1.1. Lisätyn todellisuuden elementit

Lisätyn todellisuuden vahvuus on siinä, että sovelluksen toteuttamiseen riittää normaalissa toimistotyössä käytetyt laitteet. Kuvassa 2 on yksinkertainen AR-sovellus. Se koostuu paperimarkkerista, kamerasta, tietokoneesta ja ohjelmasta. Markkeria kuvataan kameralla, jonka tuottamasta videokuvasta paikannusohjelma laskee markkerin paikan ja orientaation. Virtuaalimallin paikka päivitetään tarpeeksi nopeasti paikannusohjelman tuottamaan tietoon perustuen. Virtuaalimallia voidaan siirtää ja kuvakulmaa muuttaa markkeria tai kameraa liikuttamalla.



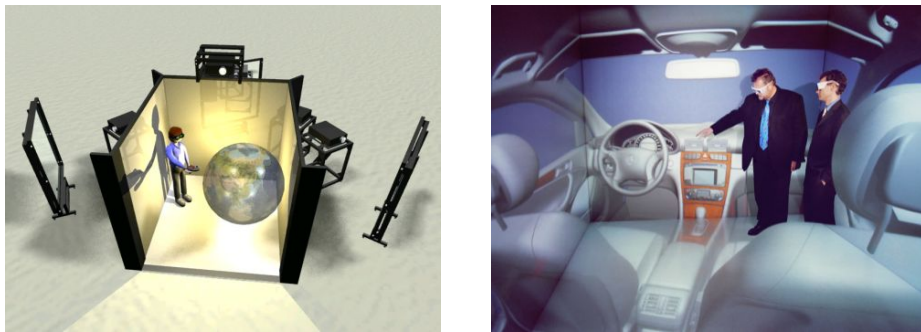
Kuva 2. Yksinkertainen AR-sovellus.

Sovellukseen voidaan lisätä toiminnallisuutta ja ominaisuuksia, jolloin eri tarpeisiin sopiva sovellus saadaan toteutettua nopeasti. Eri markkereille voidaan esimerkiksi lisätä erilaisia virtuaalimalleja, jolloin eri vaihtoehtoja voidaan tarkastella samassa kuvassa. Visualisointilaitteena voidaan käyttää tietokoneen sijasta esimerkiksi päähän

kiinnitettävää näyttölaitetta, jolloin virtuaalimalli näyttäytyy huomattavasti todellisempana.

2.1.2. Virtuaalitodellisuuden sisartechnologia

Suurten yritysten käyttämät virtuaaliympäristöt ovat jo pitkään tarjonneet mahdollisuuden tehdä virtuaalisilla prototyypeillä erilaisia simulointeja ennen fyysisen prototyypin rakentamista. Kuvassa 3 on periaatekuva kalliista virtuaaliympäristöstä ja esimerkki sen hyödyntämisestä auton suunnittelukatselmoinnissa. Korkeat hankinta- ja ylläpitokustannukset ovat kuitenkin pitäneet tällaiset laitteistot toistaiseksi vain suurten yritysten käytössä.



Kuva 3. Periaatekuva kalliista virtuaaliympäristöstä ja käytännön sovellus Mercedes-Benzin virtuaalilaboratoriossa (ESC 2007; Mercedes-Benz 2006).

Leino et al. (2010) mainitsevat virtuaaliympäristöjen suurimmaksi eduksi joustavuuden. Virtuaaliympäristön avulla käyttäjä voidaan ikään kuin upottaa erilaisiin tilanteisiin ja skenaarioihin, joissa aktiivisen läsnäolon tunteen saavuttaminen on tärkeää (Leino et al. 2010). Brewsterin (2004) mukaan virtuaalitodellisuuden avulla voidaan saavuttaa parempi ja kokonaisvaltaisempi ymmärrys tarkasteltavasta kohteesta. Lisäksi käyttäjän ja kohteen välisestä vuorovaikutuksesta syntyy luonnollisemman ja todellisemman tuntuinen.

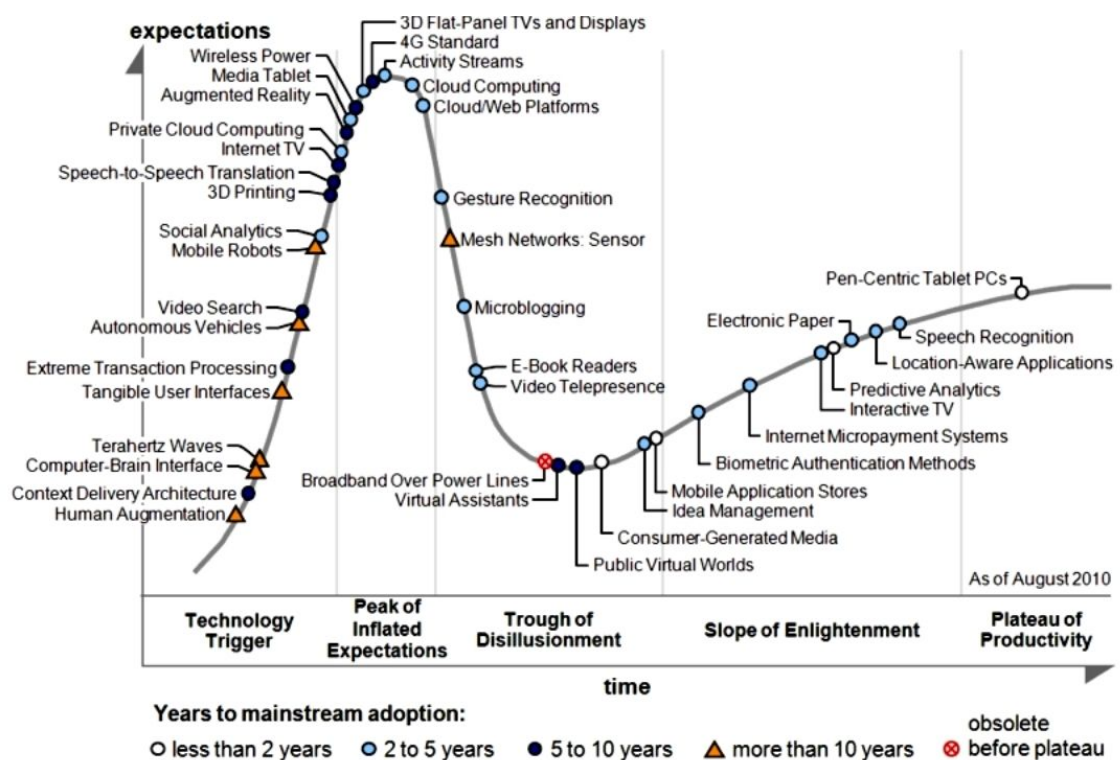
Lisätty todellisuus on hyvin lähellä virtuaalitodellisuutta ja sen avulla voidaan toteuttaa samoja asioita entistä edullisemmin. Tämän takia on tärkeää ymmärtää jonkin verran myös virtuaalitodellisuutta, jotta hahmottaa teknologioiden erot ja mahdollisuudet. Reitmaan et al. (1996) mukaan virtuaalitodellisuus on havainnoimisen kautta saatu vaikutelma todentuntuisesta, mutta teknisin keinoin luodusta olotilasta. Toisen määritelmän mukaan virtuaalitodellisuus on kokemus, jossa käyttäjä on uppoutuneena todellisen tuntuiseen virtuaalimaailmaan (Brooks 1999). Oleellista on, että virtuaalitodellisuus on luotu teknisin keinoin ja pyrkii jäljittelemään todellista ympäristöä.

Lisätyssä todellisuudessa taustalla on aina todellinen ympäristö, johon virtuaalimalli lisätään. Näin ympäristöä ei tarvitse erikseen mallintaa tai jäljitellä. Määritelmien perusteella AR kuitenkin muuttuu VR:ksi, jos taustalla oleva videokuva todellisesta ympäristöstä poistetaan ja muutetaan virtuaaliseksi ympäristöksi. Teknologiat ovat näin

ollen lähellä toisiaan ja lisätyssä todellisuudessa onkin hyödynnetty kauan aikaa virtuaaliympäristöissä käytettyjä laitteita, menetelmiä ja ohjelmia. Tässä työssä asia käännetään tavallaan päinvastoin ja lisätyn todellisuuden paikannusmenetelmää hyödyntäen visualisoidaan todellisen kokoinen virtuaalimalli, joka on aikaisemmin ollut mahdollista vain kalliilla virtuaalilaitteistolla.

2.1.3. Nouseva teknologia

Tutkimusyhtiö Gartnerin vuosittain julkaisema hypekäyrä kuvaa nuorten ja nousevien teknologioiden suhteellista kypsyyttä (kuva 4). Vuoden 2010 käyrässä AR on jälleen noussut edellistä vuotta korkeammalle ja löytyy heti huipun vierestä vasemmalta. Käytännössä tämä tarkoittaa AR:n kohdalla sitä, että parhaillaan on käynnissä massamedian hypevaihe. Seuraavaksi on Gartnerin mukaan odotettavissa AR-yritysten räjähdysmäinen kasvu ja aikaisten omaksujien ("early adopters") aktivoituminen. Käyrän loppu kuvaa sitä, että viidennes potentiaalisista käyttäjistä on valinnut teknologian. Värit kertovat aika-arvion yleiseen hyväksyntään. (Gartner 2010b.)



Kuva 4. Kuvaaja nuorten ja nousevien teknologioiden suhteellisesta kypsyydestä (Gartner 2010a)

Kuvaajasta on esitetty myös kritiikkiä, jonka mukaan se antaa helposti virheellisen kuvan, että kaikki teknologiat noudattaisivat tarkasti käyrän liikkeitä. Esimerkiksi lisätyn todellisuuden kohdalla näyttää siltä, että odotuksiin tulee lähivuosina raju pudotus. Käyrä kuvastaakin Gartnerin (2010b) mukaan vain tyypillistä nuoren teknologian kehityskulkua. Näin ollen romahdukset ja nousut ovat jokaiselle teknologialle yksilölliset. Voidaan todeta, että lisättyyn todellisuuteen kohdistuu tällä

hetkellä suuria odotuksia mutta vielä ei ole varmaa tuleeko teknologia myös täyttämään odotukset.

On kuitenkin syytä uskoa, että odotukset tulevat täyttymään ainakin osittain. Esimerkiksi Regenbrecht (2007) arvioi lisätyn todellisuuden tuottavan lähitulevaisuudessa arvokasta hyötyä myös teollisuudessa. Niin akateeminen kuin yritysmaailman usko lisätyn todellisuuden valtavaan potentiaaliin tulevaisuudessa. Toistaiseksi monipuolisia AR-sovelluksia löytyy kuitenkin paljon enemmän tutkimusmaailmasta kuin teollisuudesta. Syyksi Regenbrecht mainitsee teknologian kypsyyden mutta uskoo kuitenkin, että läpimurto on erittäin lähellä. (Regenbrecht 2007.)

Lisätyn todellisuuden ympärille muodostunut monipuolinen yritystoiminta viestii omalta osaltaan teknologian potentiaalista. Saksalainen, AR-teknologian pioneeriksi itseään kutsuva, Metaio perustettiin vuonna 2003 ja työllistää yli 60 henkilöä. Yritys kehittää lisätyn todellisuuden ohjelmistoja monipuolisesti niin kuluttajille kuin teollisuuteen. (Metaio 2010.) Vuonna 1999 perustettu Total Immersion keskittyy pääasiassa lisättyä todellisuutta hyödyntävään kuluttajamarkkinointiin mutta tarjoaa ratkaisuja myös teollisuusympäristöön. Yritys toteuttaa sovellukset pääasiassa yksittäisinä projekteina. (Total Immersion 2010.)

2.2. Visualisointi

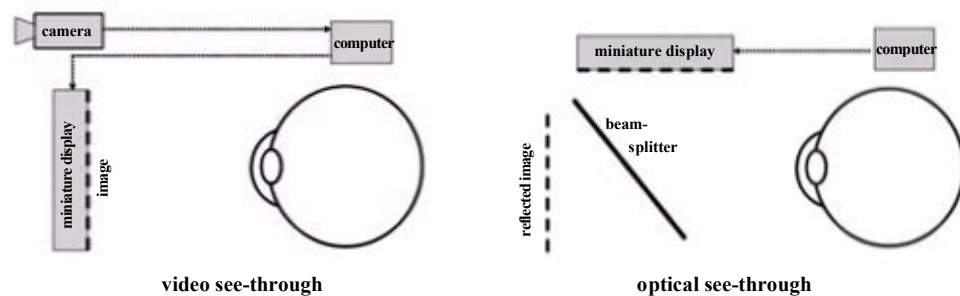
Lisätyssä todellisuudessa visualisoinnin tehtävä on näyttää käyttäjälle todelliseen ympäristöön lisätyt virtuaalimallit. Tämä toteutetaan pääsääntöisesti tuomalla videokuva käyttäjän silmän ja kohteen välille. Toteutukseen voidaan käyttää kolmenlaisia näyttölaitteita. Pähän kiinnitettävällä näyttölaitteella videokuva asettuu aivan silmien eteen. Kädessä pidettävän näyttölaitteen avulla käyttäjä voi itse määrittää videokuvan sijainnin, kun taas heijastettavan visualisointitekniikan avulla videokuva heijastetaan kappaleen pinnalle. (Bimber ja Raskar 2005.)

Visualisointitekniikan valinta vaikuttaa merkittävästi AR-sovelluksen luonteeseen. Bimberin ja Raskarin (2005) mukaan pähän kiinnitettävät näyttölaitteet ovat vielä toistaiseksi suosituin tekniikka mutta tilanne elää jatkuvasti. Esimerkiksi uuden sukupolven tablet-tietokoneet kehittyvät nyt nopeammin kuin koskaan. Tämän seurauksena lisätyn todellisuuden sovellusmahdollisuudet monipuolistuvat ja laajenevat entisestään.

2.2.1. Pähän kiinnitettävät näyttölaitteet

Pähän kiinnitettävä näyttölaite (Head-Mounted Display, HMD) on yleisin AR-sovelluksissa käytetty visualisointitekniikka. HMD-lasit jakaantuvat kahteen eri tyyppiin sen mukaan, kuinka taustalla näkyvä kuva todellisesta ympäristöstä on toteutettu. Video see-through -laseissa kuva toteutetaan kameran avulla ja optical see-through -laseissa puoliläpäisevän peilin tai LCD-näytön avulla (kuva 5). Tämän lisäksi

on olemassa vain yhdelle silmälle tai molemmille silmille tarkoitettuja HMD-laseja. (Bimber ja Raskar 2005.)



Kuva 5. Periaatekuva videoon ja optiikkaan perustuvista HMD-tekniikoista (Bimber ja Raskar 2005).

Muita vaihtelevia ominaisuuksia ovat lasien muoto, paino ja resoluutio. Kuvassa 6 on kahdet alle 500 euron HMD-lasit. Molempien resoluutio on 640x480. Resoluution kasvaessa myös hintaluokka nousee. Esimerkiksi tässä työssä käytetyt eMagin Z800-lasit tarjoavat 800x600-resoluution ja maksavat noin 1 600 euroa. Erikoiskäyttöön on saatavilla jopa 4200x2400-resoluution PiSight Ultra-Panoramic -lasit, joiden hinta vaihtelee ominaisuuksista riippuen 18 000 ja 90 000 euron välillä. (Inition 2010.)



Kuva 6. Vuzixin valmistamat CamAR- ja Wrap 920 -lasit (Vuzix 2010).

HMD-laseja on tarjolla monenlaisia niin ominaisuuksiltaan kuin hinnoiltaan. Lasien erilaisuudesta johtuen niiden vertailu ei ole aivan yksinkertaista. Valmistajat ilmoittavat esimerkiksi resoluution yhden tai kahden näytön yhdistettynä resoluutiona, joka lisää epäselvyyttä. HMD-laseja hankittaessa niitä kannattaisi testata aina henkilökohtaisesti. Jos tämä ei ole mahdollista, suuntaa antavaa vertailua kannattaa tehdä lähtökohtaisesti hinnan, resoluution ja näkökentän avulla. (Bernatchez 2007.)

HMD-lasien suurimmat heikkoudet ovat kapea näkökenttä ja alhainen resoluutio. Näitä ominaisuuksia voidaan tietenkin parantaa, mutta samalla laitteen koko kasvaa ja käytettävyys huononee. (Bimber ja Raskar 2005.) HMD-lasien kehitys lähitulevaisuudessa riippuu lähes täysin käyttäjämäärästä. Jos lasien käyttö lisääntyy kuluttajamarkkinoilla, niiden kehitys nopeutuu ja hinta suhteessa ominaisuuksiin parantuu. Muussa tapauksessa kehitys tulee todennäköisesti säilymään varsin hitaana.

2.2.2. Kädessä pidettävät näyttölaitteet

Kädessä pidettävät näyttölaitteet tarjoavat mielenkiintoisen vaihtoehdon HMD-laseille. Niiden avulla AR-sovellus voidaan visualisoida yhtä aikaa useammalle henkilölle, joka tukee paremmin ryhmätyön tekemistä. Tähän ryhmään kuuluvat matkapuhelimet ja tablet-tietokoneet. Matkapuhelin on lisätyn todellisuuden kannalta kiinnostava laite, koska se on lähes kaikilla jatkuvasti mukana. Lisäksi nykyajan matkapuhelinten laskentateho riittää yksinkertaisten AR-sovellusten käyttämiseen. Laitteen heikkoutena on kuitenkin näytön pieni koko.

Tablet-tietokoneissa on sen sijaan matkapuhelinta suurempi näyttö ja enemmän laskentatehoa. Lisätyn todellisuuden kannalta ne ovat erityisen mielenkiintoisia laitteita, koska ne ovat kevyitä kompakteja kokonaisuuksia. Näyttö, kamera, tietokone ja ohjelmisto muodostavat paketin, joka on kuin suunniteltu lisättyä todellisuutta varten. Ominaisuuksien perusteella voidaan sanoa, että laitteen etuna on kompakti koko, keveys, yksinkertaisuus ja hinta. Useimmista laitteista puuttuu kuitenkin näytönohjain, jolloin prosessorin laskentateho ei riitä raskaamman AR-sovelluksen toimintaan.

Taulukko 1. Uuden sukupolven tablet-tietokoneita ominaisuuksineen (Galaxy Tab 2011; HP Slate 2011; Ipad 2011; WeTab 2011).

Merkki	Näyttö (tuumaa)	Paino (kg)	Kamera	Käyttöliittymä
Galaxy Tab	7,0	0,39	3 MP	Android 2.2
HP Slate 500	8,9	0,68	3 MP	Windows 7
Ipad	9,7	0,68	ei ole	iOS 4
WeTab	11,6	1,00	1,3 MP	Meego

Taulukossa 1 on listattu muutamia markkinoilla olevia tablet-tietokoneita. Hinnat vaihtelevat 600 euron molemmin puolin. Galaxy Tab on hieman matkapuhelinta suurempi, kun taas WeTab on kannettavan tietokoneen kokoluokassa. Galaxy Tab ja HP Slate 500 -tabletissa on selkäpuolella AR-sovellukseen soveltuva kamera, kun taas Ipad:ssa ei ole kameraa ollenkaan ja WeTab:ssa vain etupuolella videopuheluita varten. Ipad:ssa ei ole myöskään usb-porttia, joten lisätyn todellisuuden vaatima kamera tulisi kytkeä langattomasti. WeTab:ssa voidaan käyttää normaalia usb-kameraa. Oman haasteensa matkapuhelinten ja tablet-tietokoneiden hyödyntämiseen AR-sovelluksissa tuovat käyttöjärjestelmien laaja kirjo. Esimerkiksi taulukon laitteista vain HP Slate 500 -tabletissa on pc-tietokoneessa käytetty käyttöjärjestelmä, joka mahdollistaa AR-sovelluksen siirtämisen suoraan pc-tietokoneesta tablet-tietokoneeseen. Muille taulukon tableteille toteutettaviin AR-sovelluksiin tarvittaisiin todennäköisesti ohjelmointitaitoa.

2.2.3. Paikallaan pysyvät näyttölaitteet

Yksinkertaisinta visualisointitekniikkaa lisätyn todellisuuden alueella edustaa paikallaan pysyvä näyttölaite. Tähän ryhmään kuuluu normaali tietokoneen näyttö. Tietyissä tilanteissa yksinkertaisuus ja helppous ovat muita ominaisuuksia tärkeämpiä, jolloin

paikallaan pysyvä näyttö on perusteltu valinta. Tällaista näyttöä käytettiin esimerkiksi Augmented Assembly -projektissa HMD-lasien lisänä, jotta käyttäjä pystyi turvautumaan myös tutumpaan vaihtoehtoon.

Katselmointitilanteessa on tärkeää, että kaikki ryhmän jäsenet tietävät mistä asiasta tai koneen osasta milloinkin keskustellaan. Näin ollen on tärkeää, että kaikilla ryhmän jäsenillä on sama kuva katselmoitavasta kohteesta. Jos esimerkiksi yksi henkilö käyttää HMD-laseja, niin muut voivat seurata hänen näkymäänsä isolta projektorikankaalta. Esimerkiksi tällaisessa tilanteessa paikallaan pysyvä näyttölaite on hyvä valinta.

2.3. Paikannus

Yksi parhaista asioista lisätyssä todellisuudessa on tarvittavan laitteiston yksinkertaisuus. Tämä on mahdollista paperimarkkereita tai ympäristön piirteitä hyödyntävän paikannusmenetelmän ansiosta. Yksinkertaisuuttakin tärkeämpää on kuitenkin paikannuksen riittävä tarkkuus ja nopeus. Kameran paikka ja orientaatio suhteessa lisättyyn virtuaalimalliin tulee päivittyä riittävän tarkasti ja nopeasti.

2.3.1. Markkeripohjainen menetelmä

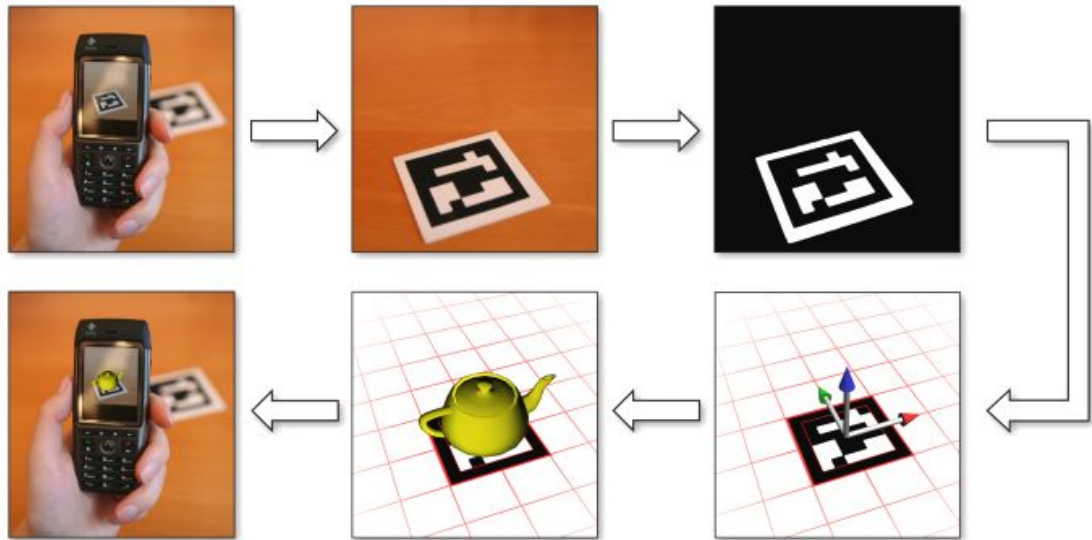
Paikannukseen on olemassa useita teknologioita, mutta konenäkö lienee ainoa, jolla paikannus voidaan toteuttaa edullisesti ja tarkasti (Fua ja Lepetit 2007). Yksi konenäön sovellus on paperimarkkereihin perustuva paikannusmenetelmä. Paikannus voi perustua joko yhteen markkeriin tai suurempaan markkeriryhmään eli markkerikenttään. Kuvassa 7 on kaksi paikannukseen käytettävää markkeria. Vähintään yksi markkeri tulee olla kameran näkökentässä, jotta paikannus toimii. Mitä enemmän markkereita kamera havaitsee, sen tarkempi paikannus saavutetaan. Markkereiden koko vaikuttaa paikannuksen tarkkuuteen ja maksimaaliseen paikannusetäisyyteen.



Kuva 7. Kaksi erilaista markkeria.

Pelkästään markkerin näkyminen kameran näkökentässä ei kuitenkaan riitä. Kuvassa 8 on esitetty paikannusprosessin eteneminen. Ensin kuvan kontrastia muutetaan siten, että värierot tulevat vahvemmiksi. Tämän jälkeen kuvasta etsitään etukäteen ohjelmalle määritetty markkeri, jonka perusteella sen paikka ja orientaatio saadaan selville. Lopuksi virtuaalimalli asetetaan markkerin koordinaatistoon. Kun

prosessi toistetaan tarpeeksi nopeasti, saadaan virtuaalimalli ikään kuin kiinnitettyä markkeriin. (Kato et al. 2000.)



Kuva 8. Paikannusprosessi paperimarkkeriin perustuen. (Wagner ja Schmalstieg 2007)

Paikannus ei rajoitu yhteen markkeriin kerrallaan vaan niitä voi olla käytössä samaan aikaan jopa satoja (ALVAR 2010). Edullisuuden ja yksinkertaisuuden lisäksi paperimarkkereiden vahvuutena on mahdollisuus liittää tietty virtuaalimalli tietylle markkerille, jolloin esimerkiksi erilaisia kokoonpanovaihtoehtoja voidaan tarkastella helposti markkeria vaihtamalla.

Tarkan ja toimivan paikannuksen edellytyksenä on kameran kalibrointi. Kameroiden ominaisuudet vaihtelevat jopa yksilökohtaisesti ja näin ollen kahden kameran kuva samasta kohteesta voi olla erilainen. Tämän vuoksi kamera tulee aina kalibroida, jolloin optiikasta johtuva virhe saadaan poistettua ja paikannus on tarkka. Kameran kalibrointia käsitellään tarkemmin kappaleessa 4.4.1.

2.3.2. Piirrepohjainen menetelmä

Kaikissa sovelluksissa paperiset markkerit eivät kuitenkaan ole paras vaihtoehto. Esimerkiksi ulkona, pidempien etäisyyksien takia, markkereiden kokoa olisi kasvatettava suhteettoman suureksi. Osittain tämän takia on kehitetty piirteisiin perustuva markkeriton paikannusmenetelmä. Siinä käytetään hyväksi ympäristössä olevia piirteitä, kuten rakennusten suoria linjoja ja muita konenäön havaitsemia pisteitä ja piirteitä. (Fua ja Lepetit 2007.)

Markkeriton paikannustekniikka on lupaava menetelmä, josta on olemassa jo näyttäviä käytännön esimerkkejä. Esimerkiksi VTT on toteuttanut sovelluksen, jossa voidaan tarkastella prosessilaitoksen modernisointikokoonpanoa todellisen laitoksen päällä. Kuvassa 9 on pysäytyskuva sovellusta esittelevästä videosta.

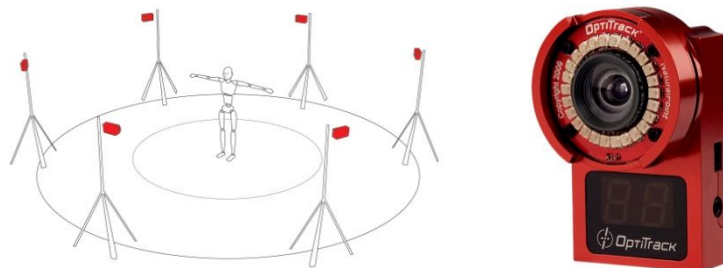


Kuva 9. Markkerittomaan paikannusmenetelmään perustuva AR-sovellus (ALVAR 2010).

Markkerittoman paikannusmenetelmän kehitys on haastavaa, sillä siinä tulee hallita kuvakulman ja valaistuksen muutokset sekä kuvan skaalautuvuudesta aiheutuvat haasteet (Fua ja Lepetit 2007). Tästä huolimatta tekniikan kehitys on ollut yllättävänkin nopeaa. Menetelmä on edelleen kehitysasteella, joten tässä työssä hyödynnetään vain yksinkertaistettua markkeritonta paikannusta. Se olettaa kameran kääntyvän vain paikallaan. Tulevaisuudessa markkerittomaan paikannukseen pohjautuvat sovellukset valtaavat suurella todennäköisyydellä lisätyn todellisuuden sovelluskentän.

2.3.3. Kalliimmat menetelmät

Edellä esitettyjen menetelmien lisäksi on olemassa myös suuri joukko muita paikannusmenetelmiä. Esimerkiksi virtuaalitodellisuuslaitteisiin keskittynyt Inition-yritys tarjoaa magneettisuuteen, optiikkaan, akustiikkaan, mekaniikkaan ja näiden yhdistelmiin perustuvia paikannuslaitteistoja (Inition 2010). Useimmat näistä menetelmistä kykenevät erittäin hyvään tarkkuuteen mutta samalla kustannukset nousevat vähintäänkin muutamaan tuhanteen euroon. Myös laitteistojen koko ja liikuteltavuus rajoittavat jossain määrin niiden käyttöä tutkimusympäristön ulkopuolella.



Kuva 10. Esimerkki infrapunavaloon perustuvasta paikannusjärjestelmästä ja kamerasta (Optitrack 2010).

Kuvassa 10 on esimerkki optisesta paikannusjärjestelmästä ja edullisen hintaluokan infrapunakamerasta. Järjestelmä hyödyntää infrapunavaloa ja pieniä valoa heijastavia palloja, joita kiinnitetään paikannettavaan kohteeseen. Kameroita tarvitaan useampia, jotta järjestelmä saa tarpeeksi paikkatietoa tarkan paikannuksen toteuttamiseksi. Optitrack-peruspaketin hinta kuudella kameralla on noin 5 000 euroa. (Optitrack 2010.)

2.4. Muu laitteisto

Näyttö- ja paikannuslaitteiden lisäksi AR-sovellukseen tarvitaan myös kamera ja tietokone. Esimerkiksi tablet-tietokoneissa kaikki elementit saattavat olla jo valmiina, mutta tällöinkin voi olla kannattavaa käyttää paremmin paikannukseen sopivaa kameraa. Jos kameraa käytetään paikannukseen, resoluutiolla ja muutamilla muilla ominaisuuksilla on suuri merkitys. Jos paikannukseen käytetään infrapunakameraa, usb-kameraa voidaan käyttää sovelluksen taustalle lisätyn videokuvan tuottamiseen, jolloin kameran ominaisuudet eivät ole yhtä tärkeitä.

2.4.1. Kamera

Lähtökohtaisesti AR-sovelluksiin riittää normaali usb-kamera. Ne ovat tarkoitettu pääasiassa videopuheluihin mutta sopivat tarkkuuden ja edullisuuden ansiosta loistavasti myös AR-käyttöön. Viimeaikoina varsinkin kameroiden resoluutio on kasvanut entisestään mikä mahdollistaa tarkemman paikannuksen. Tosin suurempi resoluutio vaatii myös enemmän laskentatehoa, joten suurin resoluutio ei ole aina paras vaihtoehto. Tärkeä ominaisuus on myös liikkuvan kuvan kiinteys. Kuvan tulee säilyä mahdollisimman ehjänä ja kiinteänä, jotta markkereiden paikannus toimii myös liikkuvasta kuvasta.



Kuva 11. Microsoft LifeCam Cinema (56,90 €) ja Logitech HD Webcam C270 (28,90€) (Verkkokauppa 2010).

Erilaisia usb-kameroita on markkinoilla runsaasti. Kuvassa 11 on kaksi pienikokoista 1024x720-resoluutioon yltävää kameraa. Molemmissa kameroissa on muutamia lisäominaisuuksia, kuten automaattitarkennus ja automaattinen valotuksen säätö (Verkkokauppa 2010). Automaattiset menetelmät eivät aina sovellu AR-sovelluksiin. Esimerkiksi automaattitarkennus tarkentaa ajoittain väärään kohtaan, jolloin kuva sumenee ja markkerit häviävät näkyvistä, jonka johdosta paikannus lopettaa hetkellisesti toimintansa. Näin ollen kannattaa pyrkiä käyttämään manuaalisia säätöjä aina, kun se on mahdollista.

2.4.2. Tietokone

Tietokoneen laskentatehoa käytetään AR-sovelluksissa pääasiassa paikannuksen ja visualisoinnin toteuttamiseen. Tarkka ja nopea paikannus on yksi lisätyn todellisuuden tärkeimpiä asioita. Kun paikannus on tehokasta, myös visualisoinnista tulee todentuntuinen. Nämä kaksi asiaa saavutetaan tarpeeksi tehokkaan paikannusalgoritmin, visualisointiohjelman ja näitä ohjaavan tietokoneen avulla.

Nykyisten tietokoneiden laskentatehot ovat korkealla tasolla. Laskentatehoa kasvattamalla saadaan kuitenkin tuotettua tarkempi paikannus ja nopeampi päivitystaajuus, joka saattaa parantaa sovellusta huomattavasti. Käytännössä korkeampi laskentateho mahdollistaa suuremman resoluution käyttämisen markkerien paikannukseen, joka taas mahdollistaa pienemmät markkerit ja tarkemman paikannuksen.

Kannettavissa laitteissa prosessoritehot ovat pienempiä, jolloin sovelluksia saatetaan joutua hieman keventämään. Prosessorit ja näytönohjaimet kehittyvät kuitenkin jatkuvasti, joka mahdollistaa entistä monipuolisempien AR-sovellusten käyttämisen entistä pienemmillä laitteilla. Tämä kehityssuunta lisää osaltaan lisätyn todellisuuden sovellusmahdollisuuksia.

2.5. Ohjelmat

Ohjelmien avulla AR-sovelluksiin toteutetaan niiden toiminnallisuus. Markkinoilla on tähän tarkoitukseen monenlaisia ratkaisuja. Ensinnäkin on olemassa pelien ja virtuaaliympäristöjen rakentamiseen tarkoitettuja virtuaalitodellisuus- eli VR-ohjelmia. Näiden avulla voidaan toteuttaa monipuolisia ja monimutkaisiakin sovelluksia varsin nopeasti. VR-ohjelmien vahvuutena on se, että ohjelmointia osaamatonkin voi toteuttaa yksilöllisiä ja näyttäviä sovelluksia nopeasti.

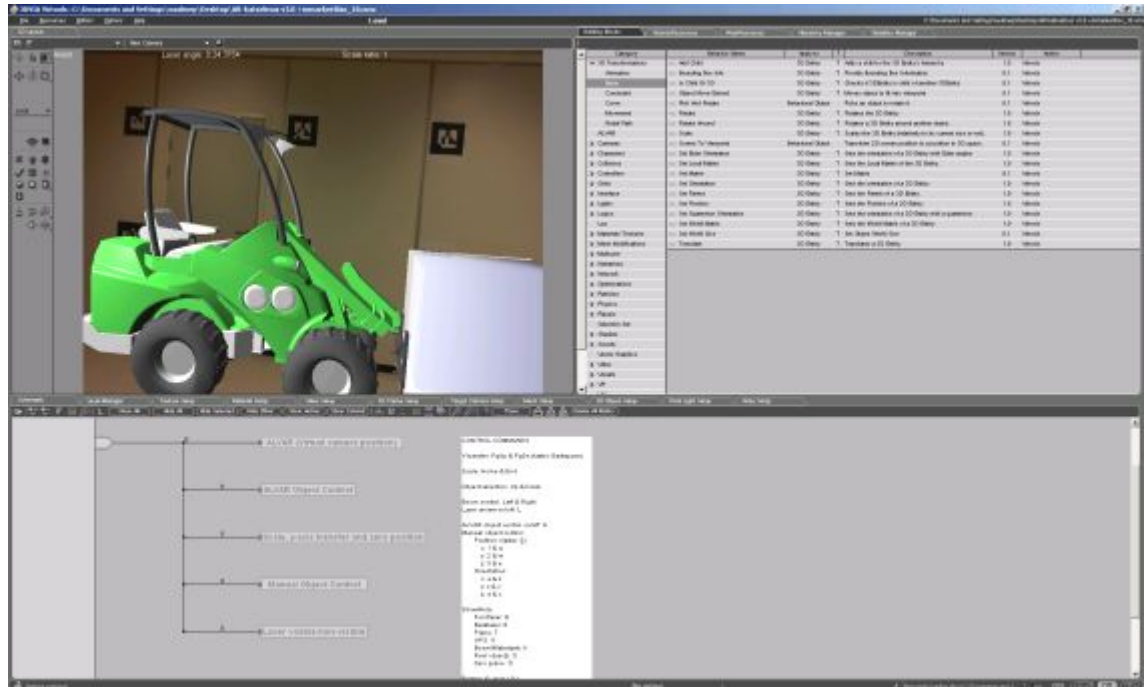
Tämän lisäksi on olemassa muutamia pelkästään lisättyyn todellisuuteen tarkoitettuja ohjelmia. Näiden avulla sovellusten toteuttaminen on vieläkin helpompaa, mutta toiminnallisuudet ovat huomattavasti rajoittuneempia. Ohjelmointitaitoisten keskuudessa luultavasti suosituin tapa on edelleen ohjelmointikirjastojen käyttäminen. Niiden avulla voidaan toteuttaa juuri sellainen sovellus kuin tarpeet vaativat. Huonona puolena on ohjelmointitaidon tarve ja sovelluksen hidas muokattavuus.

2.5.1. 3DVIA Virtools

3DVIA Virtools on ohjelmistotalo Dassault Systèmesin virtuaaliympäristöjen rakentamiseen tarkoitettu ohjelma. Yritys on keskittynyt tuotteen elinkaaren hallintaan, visuaaliseen simulointiin ja CAD-ohjelmiin. Muita yrityksen ohjelmia ovat muun muassa Catia ja SolidWorks. (Virtools 2010.) Kaupallisiin tarkoituksiin Virtools-ohjelman vuosilisensointi maksaa noin 5 000 euroa.

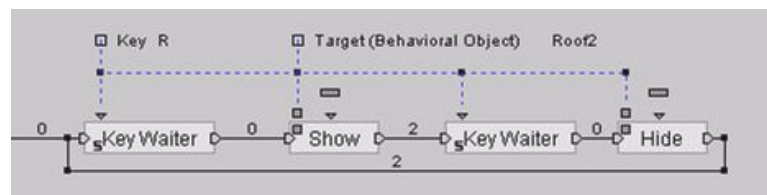
Virtoolsin vahvuus on siinä, että sillä voidaan tehdä nopeasti ilman ohjelmointitaitoa virtuaalisia prototyyppisiä ja pelimäisiä sovelluksia muun muassa tuotekehityksen ja

markkinoinnin tueksi. Virtoolsin avulla 3D CAD -malleille lisätään pelimaista toiminnallisuutta, joka mahdollistaa erilaisten käyttötilanteiden simuloimisen virtuaalisessa käyttöympäristössä. Virtuaalimallit voidaan tuoda suoraan CAD-ohjelmasta Virtoolsiin esimerkiksi 3dxml-tiedostomuodossa.



Kuva 12. Virtoolsin käyttöliittymä.

Kuvassa 12 on Virtoolsin käyttöliittymä ja sen kolme pääikkunaa. Vasemmalla on visualisointi-ikkuna, joka suurentuu sovelluksen käytön ajaksi koko näytölle. Oikealla käsitellään osien hierarkiaa ja sovelluksen rakentamiseen käytettäviä lohkoja, joista itse sovellus rakennetaan. Alhaalla tapahtuu lohkojen yhdistely ja osien hallinnointi. Sovelluksen rakentaminen tehdään yhdistämällä halutut lohkot viivoilla, josta muodostuu lohkokaaavion tapainen kokonaisuus, joka toteuttaa valitulle objektille halutun toiminnon. Ohjelma sisältää noin 500 erilaista lohkoa, joten monimutkaistenkin sovellusten rakentaminen on mahdollista. Lohkoja voidaan ohjelmoida lisää C++-ohjelmointikielellä.



Kuva 13. Esimerkki yksinkertaisesta lohkokaaviosta.

Kuvassa 13 on esimerkki yksinkertaisesta toiminnallisuudesta. Kuvan lohkokaaviossa näppäimellä R voidaan valita onko Roof2-niminen objekti näkyvissä vai ei. Kyseisessä lohkokaaviossa on käytetty kolmea erilaista lohkoa: Key Waiter, Show ja

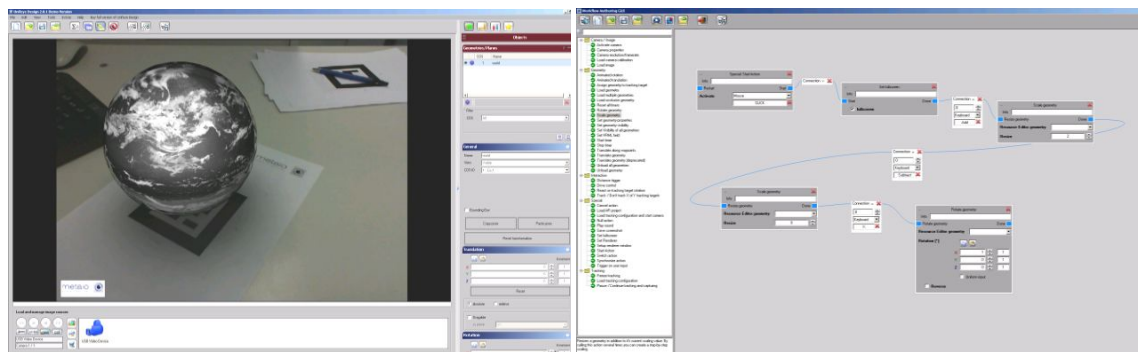
Hide. Key Waiter -lohkon aktivoijaksi on valittu näppäin R, ja Show ja Hide -lohkot ohjaavat Roof2-objektia. Lohkot on yhdistetty viivoilla, jolloin signaali kulkee vasemmalta oikealle ja lopussa takaisin vasemmalle.

Virtoolsin lisäksi Dassault Systèmes tarjoaa myös muita 3D-sovellusten toteuttamiseen tarkoitettuja ohjelmia. Vuonna 2010 yritys julkaisi Virtoolsiin pohjautuvan 3DVIA Studion, joka on tarkoitettu enemmän viihde kuin teollisuuskäyttöön. Vuoden 2011 alussa siitä on saatavilla ilmainen beta-versio. Dassault Systèmesin tavoitteena on tarjota kaikentasoisille osajille mahdollisuus tehdä laadukkaita 3D-sovelluksia, joita käyttäjät voivat julkaista 3DVIA-yhteisössä. (3DVIA 2011.)

Yritys on lähtenyt rohkeasti siirtämään painopistettä perinteisestä lisensointiliiketoiminnasta uudenlaiseen yhteisöpohjaiseen liiketoimintaan. Tässä toiminnassa yhteisö kehittää sisällön, jolloin yhteisön jäsenten käyttöön täytyy tarjota myös ilmaisia ohjelmia. Tämä tarjoaa erittäin mielenkiintoisen ulottuvuuden myös lisätyn todellisuuden kehittymiselle tulevaisuudessa.

2.5.2. Unifeye Design

Unifeye Design on Metaion kehittämä AR-ohjelma. Se on tarkoitettu ensisijaisesti markkinointia tukevien AR-sovellusten toteuttamiseen mutta ohjelmalla on mahdollista tehdä myös muuhun tarkoitukseen sopivia sovelluksia. Ohjelman hinta on 1 500 euroa, joka tekee siitä erittäin kilpailukykyisen vaihtoehdon. Ohjelmasta on tarjolla ilmaisversio, joka tarjoaa täysversion toiminnallisuuden ilman omien 3d-mallien käyttömahdollisuutta. (Metaio 2010b.)



Kuva 14. Unifeye Design -ohjelman pääikkuna ja lohko-kaaviotyökalu.

Kuvassa 14 on ohjelman ilmaisversiolla tehty yksinkertainen sovellus, jossa maapallo pyörii paperimarkkerin päällä. Oikealla on lohko-kaavio, jonka avulla maapallon kokoa voidaan muuttaa ja sitä voidaan pyörittää eri suuntaan. Sovellusten rakentaminen tapahtuu lohko-kaavioiden avulla samaan tapaan kuin Virtoolsissa. AR-sovelluksia varten tarvitsee ohjelman lisäksi vain kameran ja tietokoneen. Kameran kalibrointi ja markkerien tekeminen on ohjelman avulla erittäin helppoa. Myös suurempien markkerikenttien tekeminen on mahdollista. Ohjelma sisältää lisäksi

työkalun, jolla voidaan määrittää tietyn markkerin paikka suhteessa toiseen markkeriin. Tämä on hyödyllinen työkalu varsinkin markkerikentän toteutuksessa.

Ohjelmien suurin ero on siinä, että Unifeye Design on suunniteltu yksinomaan AR-sovelluksia varten. Tämä mahdollistaa yksinkertaisten AR-sovellusten toteuttamisen erittäin nopeasti ja helposti. Käytettävyys on hyvällä tasolla ja käytön oppii nopeasti. Monimutkaisempien sovellusten toteuttaminen saattaa kuitenkin olla mahdotonta, huomattavasti Virtoolsia suppeamman lohkokirjaston johdosta. Erilaisia lohkoja on käytössä vain kymmenesosa Virtoolsin lohkojen määrästä. Yhteenvetona voidaan todeta, että Unifeye Design ei tarjoa yhtä laajoja sovellusmahdollisuuksia kuin Virtools, mutta on hyvä vaihtoehto helpomman käytettävyytensä johdosta.

2.5.3. AR-ohjelmakirjastot

Yleisin tapa AR-sovellusten toteuttamiseksi tuntuu edelleen olevan ohjelmakirjastojen käyttäminen. Se on varsin ymmärrettävää, koska se ei aseta samanlaisia rajoituksia kuin valmiin ohjelman käyttäminen, mutta toisaalta se vaatii ohjelmointitaitoa. Näin ollen se on luonnollinen tapa ohjelmointitaitoisille henkilöille.

Tämän työn kannalta kaksi merkittävintä AR-ohjelmakirjastoa ovat ARToolKit ja ALVAR. ARToolKit on ensimmäisiä ja todennäköisesti eniten käytetty AR-kirjasto. ALVAR on sen sijaan suomalainen, VTT:n kehittämä kirjasto. Molempia päivitetään jatkuvasti entistä paremmiksi. Kaupalliseen käyttöön tarvitsee lisenssin, mutta ei-kaupallinen käyttö on molemmilla kirjastoilla ilmaista.

ARToolKit-kirjastoa kehittää Washingtonin yliopiston HIT Lab -yksikkö yhteistyössä uusi-seelantilaisen HIT Lab:n ja lisensoinnista vastaavan ARToolworks-yhtiön kanssa. Ohjelmakirjastosta löytyy valmiita C++-koodeja esimerkiksi virtuaalimallin paikan ja orientaation määrittämiseksi. Koodien avulla ohjelmointitaitoinen voi rakentaa suhteellisen nopeasti monipuolisia AR-sovelluksia. (ARToolKit 2010.)

ALVAR on samantyyppinen VTT:n ylläpitämä kirjasto. Siinä on pyritty parantamaan ARToolKit-kirjaston puutteita. Sen avulla on mahdollista toteuttaa sekä markkereihin että markkerittomaan paikannukseen perustuvia sovelluksia. Vuoden 2010 syksyllä julkaistiin myös Alvar for Virtools -ohjelmapaketti, joka mahdollistaa kirjaston tarjoamien ominaisuuksien käytön suoraan Virtoolsissa. Se tarjoaa tuen pääosin markkereita hyödyntävään paikannukseen, mutta yksinkertainen markkeriton paikannuskin on käytössä. Markkeriton paikannus tosin olettaa, että pelkästään kameran rotaatio muuttuu ja paikka pysyy muuten samana. Lähitulevaisuudessa myös kehittyneempi versio on odotettavissa. Paketista on tarjolla monipuoliset lisensointimahdollisuudet. (ALVAR 2010.) Tässä työssä toteutetut sovellukset pohjautuvat viimeksi mainittuun Alvar for Virtools -ohjelmapakettiin.

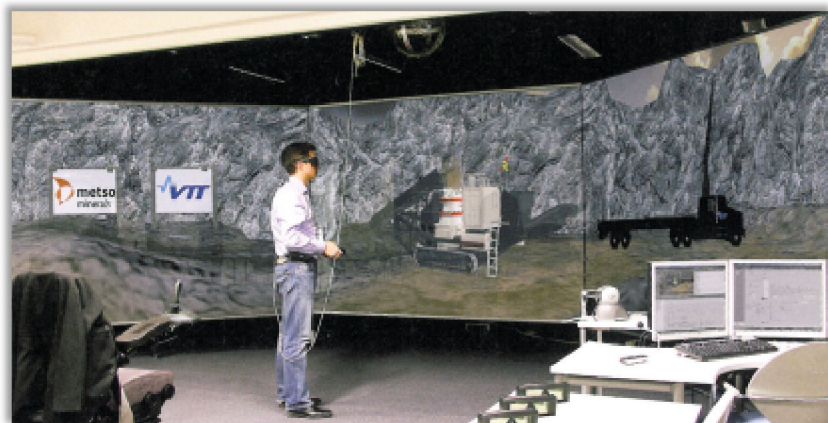
2.6. Esimerkki suorituskykyisestä laitteistosta

Markkinoilla olevista laitteista ja ohjelmista voidaan rakentaa monipuolisia laitteistokokonaisuuksia. Tässä luvussa esiteltiin edullisia, mutta lisätyn todellisuuden vaatimukset täyttäviä laitteita ja ohjelmia. Lisättyyn todellisuuteen liittyvät markkinat tulevat kehittymään lähitulevaisuudessa paljon, sillä laitteiden ja ohjelmien kehitys on vasta alussa. Tähän asti suuremman kokoluokan AR-sovellukset on toteutettu pääosin virtuaalilaitteistoja hyödyntäen.

Taulukko 2. Esimerkki suorituskykyisestä laitteistosta.

Visualisointi	3 x DepthQ DLP stereoprojektori (1280x720)
Tietokone	2 x PNY Quadro FX 5800 4GB DDR3 PCI Express
	Intel Core i7 975 Extreme Edition 3,3GHz
	Corsair Intel Core i7 6GB Kit PC3-12800
Ohjelma	Virtools 5.0
Optinen paikannus	Vicon T20 (8 kameraa)
HMD-lasit	eMagin Z800

Taulukossa 2 on esimerkki suorituskykyisestä laitteistosta, joka sijoittuu kustannustasoltaan virtuaaliympäristöjen keskiluokkaan. Kyseessä on VTT:llä sijaitsevan virtuaalilaboratorion kokoonpano, jota käytetään erilaisten virtuaaliympäristöjen toteuttamiseen. Samaa laboratoriota on käytetty Manuvar-projektissa lisätyn todellisuuden sovelluksissa. Kustannusarvio tällaiselle laitteistolle on yli 100 000 euroa. Suurimman osan kustannuksista muodostavat optinen paikannusjärjestelmä ja stereoprojektorit. Paikannusjärjestelmä sisältää kahdeksan infrapunakameraa ja paikannettavaan kohteeseen kiinnitettäviä pieniä heijastinpalloja. Infrapunakameroiden kuvasta heijastinpallojen paikat voidaan laskea erittäin tarkasti ja nopeasti.



*Kuva 15. VTT:n virtuaalilaboratorio vuonna 2008
(MASI-ohjelman uutislehti 2009).*

Kuvassa 15 on VTT:n laitteisto vuoden 2008 kokoonpanolla. Siinä ei näy nykyisin käytössä oleva optinen paikannuslaitteisto. Kuvan tilanteessa käyttäjä tarkastelee

kivenmurskaimen virtuaalista prototyyppiä sen tyypillisessä käyttöympäristössä. Käyttäjällä on päässään kevyet stereolasit, jotka tuottavat todellisen tuntuksen stereokuvan. Virtuaalimallia voidaan ohjata langattomalla peliohjaimella. Kappaleessa 3.4. esitellään tällä laitteistolla toteutettu katselmointi, jossa todellisen kokoinen virtuaalimalli visualisoidaan laboratoriotiloissa lisätyn todellisuuden avulla.

Yhteenvetona voidaan todeta, että lisätyn todellisuuden laitteista ja ohjelmista vain murto-osa on suunniteltu yksinomaan AR-tarkoituksiin. Suuri osa lisätyn todellisuuden sovelluksista rakennetaan toistaiseksi virtuaalitodellisuuden laitteita hyödyntäen. Laitteiden ja ohjelmien kehitys on suurelta osin yhteydessä AR:n tuottamaan lisäarvoon ja käyttäjien määrään. Käyttäjäjoukon kasvaessa laitteiden ja ohjelmien määrä tulee lisääntymään. Esimerkiksi peliteollisuuden mukaantulo saattaisi viedä AR-teknologiaa suurin harppauksin eteenpäin, mutta vasta tulevaisuus näyttää kuinka nopeasti laitteet tulevat kehittymään.

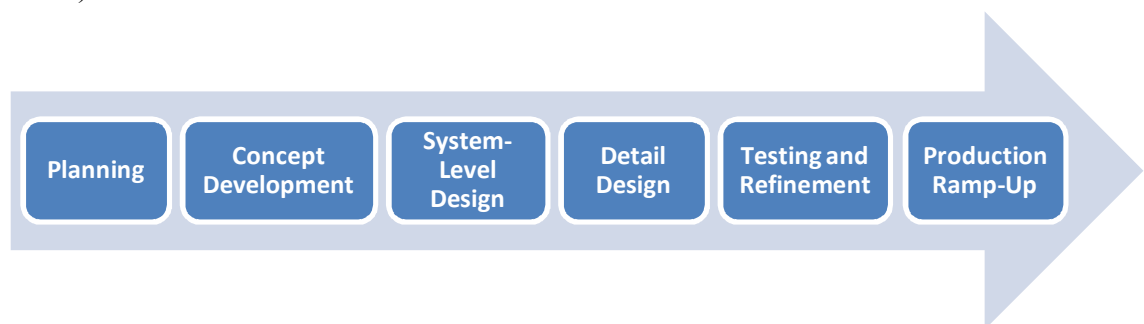
3. LISÄTTY TODELLISUUS SUUNNITTELUSSA

Tuotekehitysprosessin aikana päätetään suurilta osin tuotteen elinkaaren aikaiset kustannukset, ympäristövaikutukset ja muut tuotteeseen liittyvät asiat. Suuri osa päätöksistä tehdään tuotekehitysprosessin aikana pidetyissä katselmoinneissa. Tämä luku antaa kuvan siitä, mihin lisättyä todellisuutta on tähän mennessä sovellettu, ja mitä mahdollisuuksia teknologia tarjoaa suunnittelukatselmointien ja tuotekehityksen tueksi. Samalla esitellään aiheeseen liittyvää teoriaa ja tutkimusta.

3.1. Tuotekehitysprosessi

Tuotekehitysprosessi kuvaa tehtävät, joiden avulla tuote ideoidaan, suunnitellaan ja kaupallistetaan. Jotkut organisaatiot noudattavat tarkkaa ja yksityiskohtaista prosessia, kun taas toiset eivät välttämättä pysty edes määrittämään omaa prosessiaan. Tuotekehitysprosessi elää aina jonkun verran myös saman organisaation sisällä. Näin ollen prosessi tulisikin sovittaa aina jokaiselle projektille erikseen. (Ulrich ja Eppinger 2008.)

Tarkasti määritetty tuotekehitysprosessi auttaa organisaatiota monella tavalla. Ensinnäkin laatua on helpompi tarkkailla ja kehittää, kun tuotekehityksessä on selvät vaiheet ja tarkastuspisteet, jotka prosessin aikana ohitetaan. Lisäksi projektin koordinointi on huomattavasti vaivattomampaa, kun on selvä suunnitelma kokonaisuudesta, työntekijöiden rooleista sekä vastuualueista. Aikataulutuksen kannalta ennalta suunniteltu prosessi on erittäin tärkeää. Pienempien jaksojen avulla myös suuret projektit on mahdollista aikatauluttaa tarkemmin. Tuotekehityksen tehostaminen on huomattavasti helpompaa, kun toteutumaa voidaan verrata suunnitelmaan. Visualisoitu prosessi tarjoaa paremmat mahdollisuudet prosessin kehittämiseksi. (Ulrich ja Eppinger 2008.)



Kuva 16. Yleinen tuotekehitysprosessi Ulrichin ja Eppingerin mukaan (2008).

Kuvassa 16 on esitetty yleinen tuotekehitysprosessi. Se koostuu kuudesta vaiheesta, joita suoritetaan osittain myös samaan aikaan. Ensimmäisessä vaiheessa tehdään alustava projektisuunnitelma, joka kuvaa muun muassa tavoiteltavat asiakassegmentit, liiketoimintatavoitteet ja käytössä olevat resurssit. Suunnitelma antaa lähtötiedot seuraavan vaiheen aloittamiseksi ja toimii tavallaan oppaana tuotekehitysr ryhmälle. (Ulrich ja Eppinger 2008.)

Konseptisuunnittelun aikana määritetään asiakkaan ja käyttäjän tarpeet sekä kehitetään ja vertaillaan useita eri tuotekonsepteja, joista yksi tai useampi valitaan seuraavaan vaiheeseen. Tuotekonsepti on alustava kuvaus tuotteen muodosta, toiminnoista ja ominaisuuksista. Se sisältää myös kilpailevien tuotteiden analyysin ja taloudellisen tarkastelun muun muassa valmistuskustannuksia arvioimalla. Tässä vaiheessa tehdään alustavia prototyyppejä teollisen muotoilun avulla. (Ulrich ja Eppinger 2008.)

Systeemitason suunnittelussa määritetään tuotteen arkkitehtuuri, jossa tuote jaetaan alikokoonpanoihin ja komponentteihin sekä määritellään eri osien tehtävät. Tässä vaiheessa tehdään myös päätös tuotteen modulaarisuudesta ja alustavasta osien kokoonpanojärjestyksestä. Ulostulona systeemitason suunnittelusta on geometrinen kuvaus tuotteen osista ja paikoista sekä alikokoonpanojen tehtävien kuvaus. Systeemitason suunnittelua tehdään tiiviisti ja iteratiivisesti yhdessä viimeistelysuunnittelun kanssa. (Ulrich ja Eppinger 2008.)

Viimeistelysuunnittelussa viedään loppuun osien suunnittelu muun muassa geometrian, materiaalien ja toleranssien osalta. Tässä vaiheessa tehdään myös päätökset alihankittavista osista ja määritetään valmistusmenetelmät. Vaiheen ulostulona on yleensä tarkat 3D CAD -mallit sekä valmiit prosessikuvaukset osien valmistamisesta sekä tuotteen kokoonpanosta. Tässä vaiheessa määritetään suurilta osin tuotteen tuotantokustannukset ja kestävyys sekä toimintavarmuuteen liittyvät asiat. (Ulrich ja Eppinger 2008.)

Tuotekehitysprosessin viides vaihe on tuotteen testaus ja viimeistely. Testausta suoritetaan useilla prototyypeillä useammassa eri vaiheessa. Varhaisprototyypit tai niin sanotut alpha-prototyypit valmistetaan samanlaisista osista kuin lopullinenkin tuote, mutta valmistus- ja kokoonpanoprosessit saattavat poiketa lopullisesta. Alpha-prototyypeillä testataan, että tuote toimii suunnitellusti ja täyttää asiakkaan tarpeet. Beta-prototyyppeihin käytetään sen sijaan täysin samoja osia kuin lopulliseenkin tuotteeseen, mutta kokoonpanoprosessi voi poiketa lopullisesta. Beta-sarjalla testataan tuotteen käyttöä lopullisessa käyttöympäristössä, jotta voidaan varmistua tuotteen luotettavuudesta ja riittävästä toimintakyvystä. Molemmista vaiheista saattaa vielä syntyä muutostarpeita lopulliseen tuotteeseen. (Ulrich ja Eppinger 2008.)

Viimeinen vaihe on tuotannon käynnistäminen ja tuotteen vieminen markkinoille. On muistettava, että tuotekehitysprosessiin sisältyy myös tuotannon suunnitteleminen. Tuotteesta riippuen tuotannon käynnistäminen saattaa olla varsin pitkäkestoisenkin prosessi. Vaiheen tavoitteena on tehokas tuotanto ja hyvin lanseerattu tuote. (Ulrich ja Eppinger 2008.)

3.1.1. Suunnittelukatselmoinnit ja lisätty todellisuus

Ulrichin ja Eppingerin (2008) mukaan suunnittelukatselmointi pidetään tuotekehitysprosessin jokaisen vaiheen jälkeen. Katselmoinnilla varmistetaan, että vaiheen tavoitteet on saavutettu ja tuotekehitysohjelmaa voidaan ja kannattaa jatkaa. Usein tuotekehitysprosessi on kuitenkin yleistä mallia monimutkaisempi. Esimerkiksi viimeistelysuunnitteluvaihetta saatetaan toistaa useita kertoja, jolloin suunnittelukatselmoituksia pidetään useampia. (Ulrich ja Eppinger 2008.)

Uvan et al. (2010) mukaan suunnittelukatselmointi on ratkaisevan tärkeä vaihe tuotekehitys- ja tuotteen elinkaaren prosessissa. Suunnittelukatselmointien tarkoituksena on huomata mahdollisimman aikaisessa vaiheessa virheet ja heikkoudet, jotka liittyvät tuotteeseen, tuoteprosessiin tai valmistukseen. Näin ollen osallistujien välistä kommunikaatiota ja ideointia on tärkeää tukea. (Uva et al. 2010.)

Tuotekehitysohjelmissa syntyy Ulrichin ja Eppingerin (2008) mukaan valtava määrä tietoa, jonka pitää siirtyä tehokkaasti oikeille tuotekehitysohjelman jäsenille. Tiedon siirtymistä tehostamalla voidaan nopeuttaa koko tuotekehitysohjelmaa. Tätä varten pidetään kokouksia, joiden koko ja tiheys riippuvat muun muassa ohjelman suuruudesta. Yleensä kokouksia pidetään vähintään kerran viikossa, mutta joissain ohjelmissa jopa päivittäin. (Ulrich ja Eppinger 2008.)

Kokousten ja suunnittelukatselmointien ero ei ole yksikäsitteinen. Tässä työssä suunnittelukatselmointina pidetään tilannetta, jossa vähintään kaksi henkilöä katselmoi tai tarkastelee tuotteeseen liittyviä asioita 3d-mallin tai muun tuotteen ominaisuuksia kuvaavan mallin avulla. Käsiteltäviä asioita voi olla esimerkiksi valmistettavuus, kokoonpantavuus tai huollettavuus. On siis olemassa pienempiä ja suurempia katselmoituksia. Pääasia kuitenkin on, että katselmoituksia pidetään erikokoisina useissa tuotekehitysohjelman eri vaiheissa.

Tässä työssä esitetään edullista laitteistoa hyödyntävä lisättyyn todellisuuteen perustuva katselmointi, jonka tavoitteena on paremman visualisoinnin avulla tehostaa tiedon siirtymistä tuotekehitysohjelman jäsenten välillä. Toinen tavoite on tarvittavan ymmärryksen nopeampi ja kokonaisvaltaisempi saavuttaminen. Paremman ymmärryksen avulla ohjelmajäsenet ovat nopeammin samalla tasolla ja useampi henkilö voi osallistua keskusteluun. Tämän avulla saavutetaan laadukkaampia tuotteita ja ohjelman kokonaiskeston lyhenemistä.

Tulevaisuudessa tuotekehitysohjelmat hajaantuvat globalisoitumisen seurauksena entisestään, jolloin lisätyn todellisuuden mahdollisuudet suunnittelukatselmoituksissa tulevat lisääntymään. Tällöin tiedon siirtyminen ja tarvittavan ymmärryksen saavuttaminen on entistä haastavampaa. Suunnitelmien visualisointi ja tiedon siirtymisen tukeminen saattavat nousta olennaiseksi osaksi tulevaisuuden hajautettua tuotekehitysohjelmaa.

3.2. Aiheeseen liittyvä tutkimus

Lisättyä todellisuutta on tutkittu runsaasti. Suurin osa tutkimuksesta rajoittuu kuitenkin AR-tekniikan perustutkimukseen sekä kokoonpano- ja huoltoprosessin tehostamiseen. Varsinaisen suunnittelutyön tehostamiseen tähtäävää AR-tutkimusta on huomattavasti vähemmän.

3.2.1. AR-tutkimuksen historiaa

Yksi ensimmäisiä teollisuussovelluksia lisätyn todellisuuden alueella oli Boeingin vetämä projekti, jossa toteutettiin AR-sovellus johtojen asentamisen helpottamiseksi lentokoneeseen. Caudellin ja Mizellin mukaan (1992) ongelmia lentokoneiden kokoonpanossa aiheutti informaation siirtäminen. Suurin osa suunnittelun tuottamasta tiedosta tallennettiin CAD-malleihin, mutta kokoonpanotyöntekijöille tieto annettiin paperisina kokoonpano-ohjeina, piirustuksina ja johdotuskaavioina. Merkittävä osa kuluista ja viivytyksistä syntyivät ohjeiden päivittämisestä ja kokoonpanon ohjaamisesta. Projektin tavoitteena oli hyödyntää suoraan CAD-malleja, jolloin ohjeiden päivittäminen olisi ollut huomattavasti nopeampaa. Kokoonpanotieto annettiin kokoonpanijalle 3D-mallien ja see-through HMD-lasien avulla. Projektin menestyksestä huolimatta tekniikkaa ei otettu käyttöön Boeingilla, johtuen suurimmaksi osaksi organisatorisista syistä (Regenbrecht 2007).

Tätä seurasi useita pienempiä projekteja kunnes vuosina 1999–2003 Saksassa toteutettiin laaja ARVIKA-projekti (www.arvika.de). Sen tavoitteena oli lisätyn todellisuuden hyödyntäminen suunnittelussa, tuotannossa ja huollossa. Projektin koordinaattorina toimi Siemens. Muut osallistujat olivat autoteollisuudesta Audi, BMW, DaimlerChrysler, Ford ja Volkswagen sekä lentoteollisuudesta EADS ja Airbus. Projektissa toteutettiin useita prototyyppisiä ja julkaisuja. ARTESAS (www.artesas.de) jatkoi siitä mihin ARVIKA jäi. Vuosina 2004–2006 tavoitteena oli tutkia erityisesti huoltotehtäviin sopivia lisätyn todellisuuden sovelluksia.

Vuodesta 2006 vuoteen 2009 lisättyä todellisuutta hyödynsi ja kehitti DiFac (www.difac.net) EU-projekti. Sen tavoitteena oli toteuttaa ympäristö, joka tukee ryhmässä tapahtuvaa paikasta riippumatonta suunnittelutoimintaa entistä interaktiivisemmin. Projektissa keskityttiin erityisesti tuotteen suunnittelun, prototyyppien rakentamisen, valmistuksen ja harjoittelutoimintojen tukemiseen. Lisättyä todellisuutta hyödynnettiin muun muassa huonekalujen katselmoinnissa.

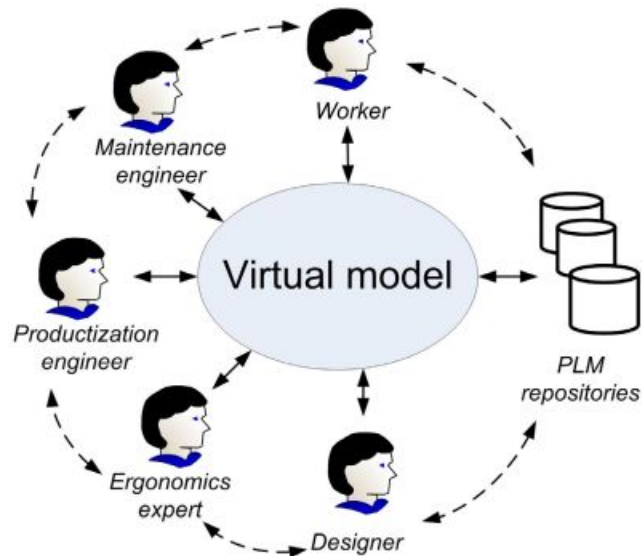
Vuoden 2010 lopulla, ManuVAR-projektin lisäksi, oli käynnissä kaksi muuta lisättyyn todellisuuteen liittyvää EU-projektia. MARCUS-projektissa kehitetään kaupunkiympäristöön soveltuvaa lisätyn todellisuuden tekniikkaa ja sovelluksia. VERITAS-projektissa tavoitteena on parantaa tuotteiden ja palveluiden laatua ja käytettävyyttä virtuaali- ja lisätyn todellisuuden avulla. (FP7.)

3.2.2. ManuVAR-projekti

Tämä työ on osa kansainvälistä ManuVAR (www.manuvar.eu) EU-projektia. Pää tavoitteena projektissa on manuaalisen työn tehostaminen koko tuotteen elinkaaren aikana virtuaali- ja lisätyn todellisuuden avulla. ManuVAR:issa on mukana kaikkiaan 18 tutkimus- ja yritysosaapuolta kahdeksasta eri maasta. Suomesta mukana ovat VTT, Tampereen teknillisen yliopiston hydraulikan ja automatiikan laitos, Metso Minerals ja Hermia Business Development. (ManuVAR 2009.)

Projektin toteutusaika on 2009–2012 ja budjetti noin 9,7 miljoonaa euroa. Projektissa osapuolet muodostavat viisi ryhmää, joissa kehitetään pää tavoitetta tukevia sovelluksia yhteistyössä muiden ryhmien kanssa. Tuloksena odotetaan syntyvän uusia työkaluja, tietotaitoa ja liiketoimintaa. (ManuVAR 2009.)

Käytännössä tavoitteet pyritään saavuttamaan tehostamalla tiedon siirtymistä ja uudelleenkäyttöä koko tuotteen elinkaaren aikana muun muassa suunnittelun, tuotannon ja huollon välillä. Projektissa kehitetään neljä eri sovellustyökalua, joita hyödyntämällä ja yhdistämällä pyritään parantamaan tiedonkulkua tuotteen elinkaaren aikana ja tehostamaan manuaalista työtä. Ensimmäinen työkalu liittyy kehittyneempään työohjeistukseen, toinen ergonomisten tarkastelujen helpottamiseen, kolmas tehtäväsuunnitteluun sekä -analyysiin ja neljäs harjoittelun helpottamiseen. Työkalut perustuvat VR- ja AR-teknologioihin. (Krassi et al. 2010.)



Kuva 17. ManuVAR-projektin tavoitetilanne tiedonkulun suhteen (Krassi et al. 2010).

Kuvassa 17 on esitetty tavoitteellinen esimerkkitalanne tuotteen elinkaaren aikaisesta tiedonkulusta. Kuva lähtee liikkeelle tilanteesta, jossa konseptisuunnittelun tuloksena suunnittelija on tallentanut PDM-järjestelmään alustavan CAD-mallin. Tämän jälkeen pidetään suunnittelukatselmointoja, joihin osallistuu asiantuntijoita suunnittelusta, ergonomiasta, tuotannosta ja huollosta. VR- ja AR-tekniikoiden myötä asiantuntijoilla on paremmat mahdollisuudet muodostaa tarvittava ymmärrys tuotesuunnitelmasta

entistä nopeammin. Tekniikoiden avulla voidaan myös katselmoida vaihtoehtoisia suunnitelmia eri asiantuntijoiden kesken. (Krassi et al. 2010.)

Yhden ManuVAR-projektissa toteutetun työkalun tavoitteena on esimerkiksi se, että ergonomia-tarkastelujen suorittaminen on entistä helpompaa ja tulokset ovat paremmin hyödynnettävissä myöhemmissä elinkaaren vaiheissa. Suunnittelukatselmoinneissa esille tulleet kommentit ja asiat tallennetaan suoraan PDM-järjestelmään tiettyyn virtuaalimalliin kytkettynä. Näin ollen tuotteen elinkaaren alussa luotua dokumentaatiota voitaisiin hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti myös huolto- ja käyttöohjeissa. (Krassi et al. 2010.)

3.2.3. Tutkimus Suomessa

Suomessa johtavaa lisätyn todellisuuden tutkimusta tekee VTT:n Augmented Reality -yksikkö. Siihen kuuluu yhdeksän työntekijää johtajanaan professori Charles Woodward. He ovat julkaisseet useita artikkeleita ja kehittäneet muun muassa ALVAR-ohjelmakirjaston. Muutaman vuoden aikana yksikkö on ollut mukana noin viidessätoista tutkimusprojektissa. (ALVAR 2010.) Myös tässä työssä hyödynnetään AR-yksikön kehittämää ohjelmakirjastoa ja sen lisäosaa.

Augmented Reality -yksikkö oli mukana vuosina 2006–2009 toteutetussa Augmented Assembly – Ohjaava kokoonpano -projektissa. Toisena tutkimusosapuolena toimi Tampereen teknillisen yliopiston tuotantotekniikan laitos. Yritysosapuolina olivat Valtra Oy, Kalmar Industries Oy, Sandvik Mining and Construction Oy, Wärtsilä Corporation, Wärtsilä Finland Oy, Metso Paper Oy ja Deltatron Oy. (Salonen et al. 2009.)

Projektin tavoitteena oli tuoda lisätyn todellisuuden teknologia yksittäis- ja piensarjatuotteiden kokoonpanotyöhön, ja kehittää suunnittelu- ja valmistusprosessia tukemaan kokoonpanotyötä paremmin. Tuloksena syntyi menetelmä AR:n käyttöönottoon tuotantoympäristössä ja tutkimustietoa AR:n hyödyllisyydestä kokoonpanossa. Projektissa opiskelijoille suoritettussa kokeessa mitattiin traktorin työhydrauliikkaventtiilin kokoonpanoa paperiohjeiden ja AR-ohjeiden avulla. Tutkimuksen mukaan AR-ohjeiden avulla kokoonpano nopeutui 15 % ja virheiden lukumäärä väheni 84 %. (Salonen et al. 2009.) Projektissa toteutettu AR-sovellus on esitetty tarkemmin kappaleessa 3.3.4.

Virtuaalisen suunnittelun kehittämiseen liittyviä Tekesin rahoittamia yritysprojekteja on parhaillaan käynnissä kaksi kappaletta. Valmet Automotiven projektissa tavoitteena on kehittää virtuaaliseen suunnitteluun tähtäävää osaamista sille tasolle, että yritys pystyy jatkossa vastaamaan tarpeisiin, joissa tuotteen tuotannollistamisen suunnittelu onnistuu oikeilla menetelmillä ja työkaluilla ilman varsinaisia fyysisiä osia. (Tekes 2010a.)

Tuuliturbiinivaihteistoja valmistavan Moventaksen tavoitteena on sen sijaan kehittää virtuaaliprototypoinnin ja simuloinnin avulla teknisesti erinomaisia tuotteita, jotka tulevat erottamaan heidät kilpailijoistaan. Yritys odottaa saavansa virtuaalimallinnuksen avulla parempaa ymmärrystä vaihteen todellisesta kuormitusympäristöstä. Yhdistettynä

ymmärrys reaaliaikaiseen mittaustietoon käyttöolosuhteissa syntyy edellytykset koko tuotteen elinkaaren aikaisiin huoltopalveluihin. (Tekes 2010b.)

3.2.4. Tutkimus maailmalla

IMPROVE-tutkimusprojektissa Santos et al. (2007) kehittivät AR-sovelluksen suunnittelukatselmointien tukemiseksi autoteollisuuden ja arkkitehtien avuksi. Tavoitteena oli kehittää järjestelmä, jossa on mahdollista käyttää useita HMD-laseja ja tablet-tietokoneita yhtä aikaa. Lopputuloksena he saivat kehitettyä kokonaisuuden, jossa oli mahdollista jakaa yksinkertaisia 3D-malleja sisältävää videokuvaa HMD-lasien ja tablet-tietokoneiden kesken. Tulevaisuuden haasteiksi mainittiin nopeamman ja vakaamman markkerittoman paikannuksen kehittäminen sekä samassa projektissa kehitettyjen see-through HMD-lasien jatkokehittäminen.

Klinker et al. (2002) toteuttivat AR-sovelluksen BMW:n tuotekehityksen tueksi. Tavoitteena oli tarjota apuväline tuotesuunnittelijoille, jotta suunnitteluprosessissa olevia kehityskierroksia voitaisiin tehdä samassa ajassa nykyistä enemmän. Visualisointiin käytettiin HMD-laseja, joiden avulla todellisessa koossa oleva virtuaaliprototyyppi visualisoitiin tilaan, jossa normaalisti tarkastellaan savesta tehtyjä prototyyppisiä. Suurimmat tuotesuunnittelijoilta tulleet kehityskohteet koskivat HMD-lasien pientä näkökenttää ja resoluutiota sekä virtuaalimallin geometristä epätarkkuutta. Samalla kuitenkin arvioitiin, että AR:n kehittyessä käytössä olevien suurten visualisointiseinien tarve tulee vähenemään.

Dunston et al. (2002) ja Poh et al. (2005) esittivät julkaisuissaan kehittämänsä sovellukset suunnittelun ja suunnittelukatselmointien tukemiseksi. Molemmissa sovelluksissa CAD-ohjelmasta tuotuja malleja voitiin tarkastella paperimarkkerin päällä HMD-lasien ja tavallisen näytön avulla. Sovellukset oli toteutettu C++-ohjelmointikielellä ARToolKit-ohjelmakirjastoa hyödyntäen. Dunston et al. mainitsivat sovelluksen suurimmaksi hyödyksi mahdollisuuden tarkastella virtuaalimallia luonnollisesti ja nopeasti eri kulmista. Valitettavasti aikanaan edistyksellisiä sovelluksia ei ole kuitenkaan tietävästi kehitetty edelleen.

Kaufmann (2004) tutki väitöskirjassaan lisätyn todellisuuden hyödyntämistä opetuksessa. Tulosten mukaan lisätty todellisuus aktivoi käyttäjiä osallistumaan. Geometrinen kappale ei ole enää abstrakti vaan AR:n avulla kappale voidaan nähdä ja kokea suhteessa omaan kehoon. Myös Brereton ja McGarry (2000) tutkivat kuinka fyysiset objektit tukevat suunnitteluajattelua ja kommunikaatiota. Tulosten mukaan suunnittelutyö helpottuu, jos käytössä on fyysisiä objekteja. Lisäksi nopeat ja karkeat prototyyppit ovat suunnitteluprosessin kannalta parempia kuin aikaa vievät tarkat prototyyppit. Heidän mukaansa lisätyn todellisuuden avulla voidaan tarjota korvike fyysisille objekteille.

Näiden lisäksi Uva et al. (2010), Pentenrieder et al. (2007) ja Woohun & Jun (2005) ovat tehneet lisätyn todellisuuden ja suunnittelun alueella tutkimusta, johon liittyen he ovat kehittäneet erilaisia sovelluksia. Näitä sovelluksia esitellään tarkemmin

seuraavassa, koska ne antavat hyvän kuvan siitä, kuinka monipuolisesti lisättyä todellisuutta voidaan hyödyntää suunnittelussa.

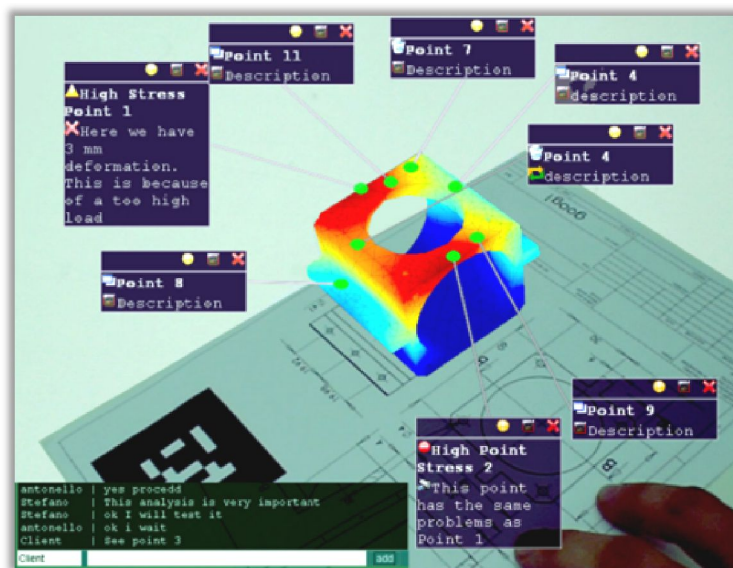
3.3. AR-sovelluksia

Erilaisia lisätyn todellisuuden sovelluksia ilmestyy jatkuvasti, kiihtyvällä tahdilla lisää. Toteutettuja sovelluksia tarkastelemalla voidaan ymmärtää paremmin, minkälaisia mahdollisuuksia lisättyyn todellisuuteen liittyy. Sovellusesimerkeistä voidaan huomata, että lisätty todellisuus tarjoaa erittäin monipuoliset sovellusmahdollisuudet vaikka laitteistoksi riittää usein normaali tietokone ja edullinen usb-kamera.

3.3.1. Sovellus suunnittelukatselmointien tueksi

Uva et al. (2010) esittävät uuden tavan hyödyntää lisättyä todellisuutta maantieteellisesti hajautetuissa suunnittelukatselmoineissa. Heidän mukaansa aikaisemmin ei ole kehitetty lisättyä todellisuutta hyödyntävää suunnittelukatselmointiohjelmaa, jonka ominaisuuksiin kuuluu helppo käytettävyys ja muunneltavuus sekä edullisten laitteiden ja kaupallisten ohjelmien hyödyntäminen. Tässä yhteydessä kaupallisten ohjelmien hyödyntäminen tarkoittaa niiden liittämistä osaksi tutkimusryhmän itse kehittämää ohjelmaa, joka toteutettiin C++-ohjelmointikielellä.

Kehitetyn ohjelman avulla lujuuslaskennan visualisointia voidaan tarkastella suoraan todellisen kappaleen pinnalla. Päätaavoitteena oli parantaa simulaatioiden visualisointia hajautetuissa suunnittelukatselmoineissa, jotta eri maissa olevat osallistujat pystyvät tehokkaampaan ryhmätyöskentelyyn. Kuvassa 18 näkyy lujuuslaskennan visualisointi, joka on lisätty todellisen kappaleen pinnalle. Paikannus toteutettiin suunnittelupiirustukseen lisätyn markkerin avulla. (Uva et al. 2010.)



Kuva 18. Esimerkkitilanne ohjelman käyttöliittymästä. (Uva et al. 2010)

Ohjelma tukee internetin välityksellä tapahtuvaa suunnittelukatselmointia, jolloin käyttäjät voivat istua maantieteellisesti eri paikoissa. Kuvassa näkyvät kommentit ovat käyttäjien lisäämiä huomioita suunnitelmaan liittyen. Ohjelma mahdollistaa myös reaaliaikaisen keskustelun, joka toteutettiin alakulmassa näkyvän keskustelualueen avulla. Muutoskommenttien liittämistä katselmoitavaan osaan sekä keskustelumahdollisuutta pidettiin erittäin hyödyllisinä ominaisuuksina, jotka edesauttavat tiedon siirtymistä hajautetuissa suunnittelukatselmoinneissa. Jatkokehitys tulee keskittymään paremman käyttöliittymän luomiseen sekä markkerittoman paikannusmenetelmän hyödyntämiseen. (Uva et al. 2010.)

3.3.2. Lisätty todellisuus tehdassuunnittelussa

Metaio ja Volkswagen tutkivat projektissaan lisätyn todellisuuden hyödynnettävyyttä tehdassuunnittelun apuna. Yksi kehitetyistä sovelluksista oli tuotantolinjan uudelleensuunnittelun tukeminen AR:n avulla. Kuvassa 19 tarkastellaan uutta korimallia vanhassa tuotantoympäristössä. Parantuneen visualisoinnin ansiosta mahdolliset törmäykset voidaan havaita normaalia aikaisemmin ja todennäköisemmin. Tilatarkasteluja toteutettiin sekä videoon että korkeamman resoluution kuviin perustuen. Videoihin perustuen tarkkuus oli yhden ja kahdenkymmenen senttimetrin välillä tarkastelualueen koosta riippuen. Kuvien avulla päästiin kymmenen kertaa tarkempiin lopputuloksiin. (Pentenrieder et al. 2007.)



Kuva 19. Uuden korimallin tilatarkastelua vanhalla tuotantolinjalla (Pentenrieder et al. 2007).

Pentenrieder et al. (2007) arvioivat, että sovelluksen avulla aikaa ja kustannuksia säästyy noin 25 prosenttia aikaisempaan nähden. Tutkimuksen testikohteessa suunnitteluvarmuus nousi 80 prosentista 98 prosenttiin. Termi kuvastaa sitä, kuinka suurella varmuudella suunnittelussa on huomioitu kaikki tarvittavat asiat. Jatkokehitystoimet painottuivat käytettävyyden ja ohjelman toiminnallisuuden lisäämiseen. (Pentenrieder et al. 2007.) Nykyisin Metaiolta on saatavilla tehdassuunnittelua helpottava Planner-ohjelma, joka perustuu osittain myös tähän tutkimukseen (Metaio 2010b).

3.3.3. Käytettävyystestaus AR:n avulla

Woohun ja Jun (2005) ovat tutkineet lisätyn todellisuuden hyödyntämistä nopeiden prototyyppien toteuttamiseksi ja testaamiseksi. AR:n avulla on mahdollista käyttää pohjana yhtä fyysistä prototyyppiä, jonka päälle lisätään erilaisia väri- ja käyttöliittymävaihtoehtoja. Tutkimuksessa toteutetulla sovelluksella molempia ominaisuuksia voidaan muuttaa hetkessä ilman fyysisen mallin muuttamista.



Kuva 20. Robottipölynimurin käytettävyystestaus lisätyn todellisuuden avulla (Woohun ja Jun 2005).

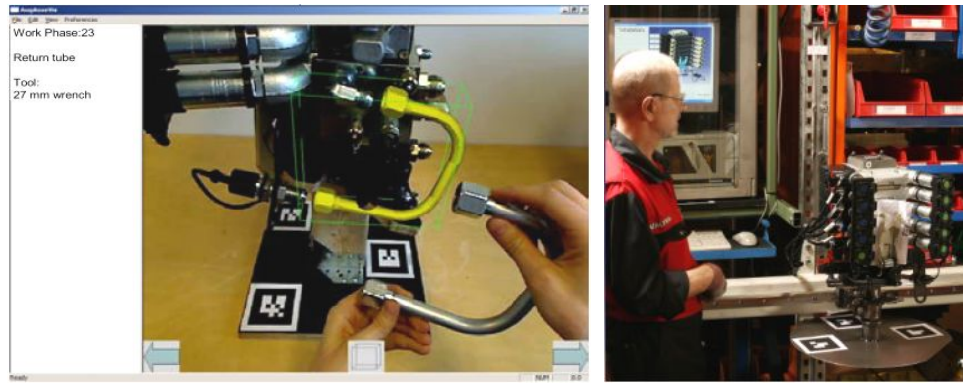
Kuvassa 20 käyttäjä testaa robottipölynimuriprototyypin käytettävyyttä. Huomattavaa oikeanpuoleisessa kuvassa on käden näkyminen virtuaalimallin päällä. Tämä on toteutettu tunnistamalla käsi ihonvärin perusteella. Tämän jälkeen virtuaalimalliin on leikattu käden alueen kokoinen aukko, joka päivittyy reaaliaikaisesti. Tällainen lisäominaisuus vaatii lisää laskentatehoa tietokoneelta, jonka johdosta todellisessa sovelluksessa leikkausalue oli varsin karkea. (Woohun ja Jun 2005.)

Sovelluksen avulla on mahdollista testata erilaisia ideoita ja konsepteja nopeasti loppukäyttäjien avustuksella. Jatkokehitystoimenpiteet painottuivat paikannusmenetelmän kehittämiseen, jotta virtuaalimalli pysyisi paikallaan myös silloin, kun käsi peittää markkerin kokonaan. (Woohun ja Jun 2005.)

3.3.4. Hydraulikkalohkon kokoonpano

Augmented Assembly -projektissa toteutettiin sovellus, jonka avulla kokoonpano-ohjeista saatiin visuaalisempia ja helpommin ymmärrettäviä. Ohjelmana käytettiin projektissa toteutettua AugAsseVis-ohjelmaa, joka perustui ALVAR-ohjelmakirjastoon. Sovellusta testattiin sekä teknillisellä yliopistolla opiskelijoiden avustuksella että Valtran tehtaalla oikealla kokoonpanopaikalla työntekijöiden toimesta. (Salonen et al. 2009.)

Paikannukseen käytettiin normaalia usb-kameraa, joka kiinnitettiin nivelellä varustettuun varteeseen, jotta kokoonpanija pystyi käyttämään molempia käsiä kokoonpanotyöhön. Visualisointilaitteena testattiin paikallaan olevaa näyttöä ja see-through HMD-laseja. Paikannuksessa käytettiin kolmea alustaan kiinnitettyä paperimarkkeria. Kuvassa 21 on esitetty ohjelman testitilanteet. (Salonen et al. 2009.)



Kuva 21. Ohjelma käytössä laboratorio- ja tehdasympäristössä (Salonen et al. 2009).

Lähtötietona ohjelmassa käytetään STEP-tiedostomuotoon tallennettuja CAD-malleja. Tämän jälkeen työvaiheet ohjeistetaan ja animoidaan sekä suoritetaan tarvittaessa CAD-mallin keventäminen. Tuloksena saadaan askel askeleelta etenevä aikaisempaa visuaalisempi ohjeistus, joka voidaan tehdä myös kulttuurista ja kielestä riippumattomaksi. (Salonen et al. 2009.)

3.3.5. Sormet osoittimena

Lisätyn todellisuuden mahdollisuudet laajenevat entisestään, jos sovelluksen ohjaamiseen hyödynnetään sormien paikannusta. Yksi mahdollisuus sormien paikantamiseksi on konenäön hyödyntäminen. Paikannus on mahdollista toteuttaa monella eri tavalla. Letessier ja Bérard (2004) toteuttivat paikannuksen etsimällä kuvasta sormenpään kokoisia ympyrän kaaria. Lee ja Chun (2009) sen sijaan paikansivat koko käden, jonka perusteella myös sormet paikannettiin.



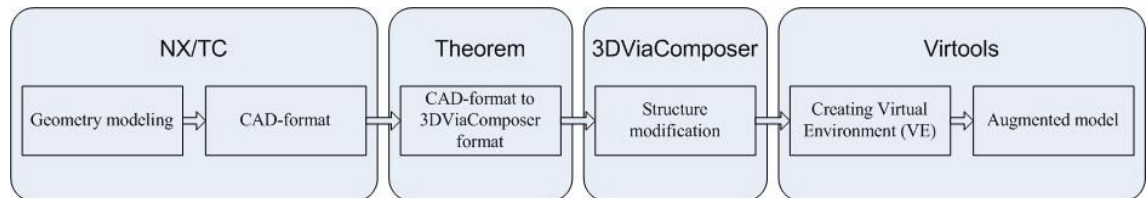
Kuva 22. Esimerkkisovellus sormien käyttämisestä ohjaimena (Metaio 2010a).

Kuvassa 22 on pysäytyskuva videosta, jossa esitellään Metaion ja teollisuusrobotteja valmistavan KUKA yrityksen toteuttamaa sovellusta. Robotin virtuaalimallia voidaan ohjata asettamalla sormi paperille tulostetun painikkeen päälle. Painikkeita voidaan käyttää myös yhtä aikaa, jolloin robotti tekee kaksi liikettä samaan aikaan. Luonnollisesti tällainen käyttöliittymä tarjoaa erittäin laajat ja monipuoliset sovellusmahdollisuudet myös muihin tarkoituksiin.

3.4. AR-katselmointi suorituskykyisellä laitteistolla

ManuVAR-projektissa toteutettiin kesällä 2009 lisättyä todellisuutta hyödyntävä suunnittelukatselmointi VTT:n virtuaalilaboratoriossa. Tällä haluttiin selvittää suorituskykyisellä laitteistolla toteutetun AR-katselmoinnin hyödyllisyyttä. Katselmoinnin kohteena oli liikkuvan murskauslaitoksen moottorin kokoonpano- ja huoltoprosessi. Katselmointiin osallistui noin viisitoista henkilöä tuotetta valmistavan yrityksen eri toiminnoista, kuten tuotekehityksestä, tuotannosta ja huollosta. (Mäkiranta et al. 2011.)

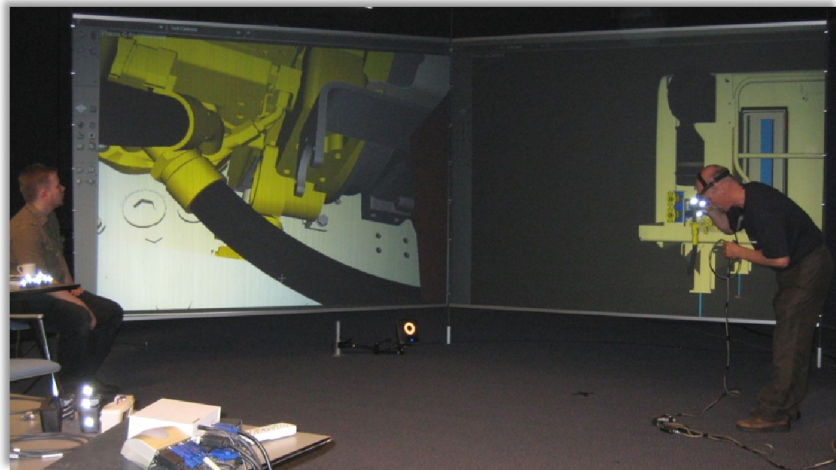
Sovelluksessa käytettiin HMD-laseja, optista paikannusta, kolmea projektoria sekä Virtools-ohjelmaa. Laitteisto on esitelty tarkemmin kappaleessa 2.6. Moottorikokoonpanon virtuaalimalleina hyödynnettiin olemassa olevia suunnittelumalleja kuvan 23 mukaisesti. Ensin CAD-mallit muutettiin Theorem-ohjelmalla 3DViaComposer-ohjelman käyttämään tiedostomuotoon. Lopuksi mallit siirrettiin 3dxml-muodossa Virtoolsiin. (Mäkiranta et al. 2011.)



Kuva 23. Eräs tapa viedä suunnittelumallit AR-sovellukseen (Mäkiranta et al. 2011).

Katselmointi alkoi HMD-laseihin ja muuhun järjestelmään tutustumalla. Tämän jälkeen aloitettiin varsinainen katselmointi, jossa kokoonpanoprosessia käytiin vaihe vaiheelta läpi. Yksi asentajista käytti HMD-laseja katselmoinnin alusta loppuun yli kahden tunnin ajan. Samalla muut pystyivät seuraamaan asentajan näkymää projektorikankaalta ja antamaan kommentteja sekä pyytämään asentajaa tekemään tiettyyn osaan liittyviä tarkastuksia. (Mäkiranta et al. 2011.)

Asentajalla oli käytössään myös virtuaalinen käsi ja taskulamppu. Lisätyssä todellisuudessa virtuaalinen malli lisätään todellisen kuvan päälle, jolloin käyttäjän oma käsi jää lisätyn kuvan taakse. Virtuaalisen käden avulla käyttäjä pystyi hahmottamaan mallia ja sen mittakaavaa luonnollisesti oman kätensä avulla. Taskulampun avulla simuloitiin kentällä tapahtuvaa huoltotilannetta. Virtuaalista käsimalli ja taskulamppua ohjattiin käsiin kiinnitettävillä heijastinmarkkereilla. (Mäkiranta et al. 2011.)



Kuva 24. Käyttäjä tarkastelee virtuaalimallia HMD-lasien avulla. (Mäkiranta et al. 2011)

Käyttäjän näkymä heijastettiin vasemmalle ja kokonaiskuva katselmoitavasta tuotteesta keskimmaiselle ruudulle. Esille tulleet kommentit oli mahdollista tallentaa tiettyyn osaan liittyen, jolloin osan nimi ja kommentti tallentui tekstitiedostoon. Kommentit näytettiin oikealla ruudulla. Kuvassa 24 käyttäjä tarkastelee letkujen kiinnityskohtaa. Heijastavat pisteet ovat optisen paikannusjärjestelmän käyttämiä pieniä heijastinmarkkereita. (Mäkiranta et al. 2011.)

Tällainen katselmointi mahdollistaa todellisen kokoisen virtuaalimallin tarkastelemisen laboratorioympäristössä. Käyttäjien mielestä todellisen kokoisen virtuaalimallin avulla kokonaisuuden hahmottaminen oli helpompaa kuin perinteisesti käytetyn CAD-ohjelman avulla. Lisäksi virtuaalinen käsi auttoi mittakaavan hahmottamisessa. Tärkeä asia oli myös luonnollisesti ja tarkasti toiminut visualisointi. Katselmointi saavutti työntekijöiden hyväksynnän, joka on erittäin tärkeää menetelmän käyttöönnotolle yritys- ja teollisuusympäristössä. (Mäkiranta et al. 2011.)

3.5. Teoriaosuuden johtopäätökset

Luvuissa kaksi ja kolme esiteltiin lisätyn todellisuuden perusteet ja teknologian kytkeytyminen tuotekehitysprosessiin. Lisäksi esiteltiin alaan liittyvää tutkimusta ja sovelluksia. Tällä haluttiin luoda kuva siitä, mihin lisättyä todellisuutta on tähän mennessä sovellettu ja mitä mahdollisuuksia teknologia tarjoaa suunnittelukatselmointien ja tuotekehityksen tueksi.

Lisätyn todellisuuden laitteista ja ohjelmista vain murto-osa on suunniteltu yksinomaan AR-tarkoituksiin. Toistaiseksi suuri osa lisätyn todellisuuden sovelluksista toteutetaankin virtuaalitodellisuuden laitteita hyödyntäen. Teoriaosuudessa esiteltiin edullisia, mutta lisätyn todellisuuden vaatimukset täyttäviä laitteita ja ohjelmia. Lisättyyn todellisuuteen liittyvät markkinat tulevat suurella todennäköisyydellä kehittymään lähitulevaisuudessa paljon, jonka seurauksena uusien AR-käyttöön suunniteltujen laitteiden ja ohjelmien määrä tulee lisääntymään.

Luvussa 3 esitetyt sovellukset hyödyntävät lisättyä todellisuutta uusilla tavoilla ja mahdollistavat tehokkaamman ja laadukkaamman tiedon siirtymisen. Yleinen tapa näyttää kuitenkin olevan, että tutkimusprojekteissa toteutetut sovellukset tehdään ohjelmointikielen avulla, jolloin riskinä on sovellusten kehityksen loppuminen tutkimusprojektin päättymisen yhteydessä. Tämä ei edesauta parhaalla mahdollisella tavalla teknologian leviämistä, koska yritykset ottavat harvoin käyttöön tutkimusprojekteissa kehitettyjä ohjelmia, joiden toimivuus ja yhteensopivuus on epävarmaa projektin päättyttyä.

Teoriaosuuden perusteella voidaan sanoa, että teknologiaa voidaan soveltaa erittäin monipuolisesti erilaisiin tarpeisiin. Näyttää siltä, että lisätty todellisuus etsii parhaillaan rajoja, joiden sisällä se tarjoaa hyötyjä nykyisiin toimintatapoihin nähden. Laitteiden ja ohjelmien kehitys on suurelta osin yhteydessä AR:n tuottamaan lisäarvoon ja käyttäjien määrään. Näin ollen uusia mahdollisuuksia lisätyn todellisuuden hyödyntämiseksi syntyy jatkuvasti lisää. Nyt on tärkeää toteuttaa sovelluksia, jotka ovat helposti siirrettävissä ja kopioitavissa tutkimusympäristön ulkopuolelle.

4. EDULLINEN AR-KATSELMOINTI

Tässä luvussa esitellään konstruktiivinen tapaustutkimus, jossa edullisella laitteistolla toteutettiin lisättyä todellisuutta hyödyntävä katselmointi. Käytetyn laitteiston kustannukset ovat noin kymmenesosan aikaisemmin esitellyn, suorituskykyisen laitteiston kustannuksista. Toteutettu katselmointi koostui kahdesta eri sovelluksesta, joiden käyttöä testattiin testikäyttäjien avulla. Ensimmäisessä sovelluksessa autonomisen työkonteen katolla olevat ohjausyksiköt aseteltiin optimaaliseen järjestykseen. Toisessa sovelluksessa toteutettiin visualisointiympäristö, jossa 3D-mallia voitiin tarkastella todellisessa koossa.

4.1. Tavoite

Konstruktiivisen tapaustutkimuksen tavoitteena oli selvittää onko AR-katselmointi mahdollista toteuttaa kaupallisilla ohjelmilla edullisesti ja laadukkaasti ilman ohjelmointitaitoa. Lisäksi haluttiin selvittää toteutettujen sovellusten käytettävyyttä ja hyväksyttävyyttä käyttäjän näkökulmasta. Tämä tehtiin keräämällä käyttäjien kokemuksia katselmoinnin aikana ja sen jälkeen. Käyttäjäkokeimuksia kerättiin kymmeneltä käyttäjältä liitteenä 1 olevan haastattelulomakkeen avulla. Tämän lisäksi aikaisemmin kalliimmalla laitteistolla toteutetun AR-katselmoinnin perusteella tiedettiin, että käyttäjälle visualisoitu todellisen kokoinen 3D-malli tarjoaa lisähyötyä perinteiseen katselmointiin verrattuna (ks. kappale 3.4.). Näin ollen haluttiin selvittää tarjoaako edullisella laitteistolla toteutettu katselmointi samanlaista lisähyötyä.

Tavoitteeseen pääsemiseksi toteutettiin kahden sovelluksen AR-katselmointi. Ensimmäisen sovelluksen tavoitteena oli selvittää lisätyn todellisuuden hyödynnettävyyttä entistä aktiivisemmän suunnittelukatselmoinnin toteuttamiseksi. Toisessa sovelluksessa keskityttiin mahdollisimman hyvän visualisointiympäristön toteuttamiseen, jossa olisi mahdollista tarkastella todellisen kokoista virtuaalimallia. AR-katselmoinnin ensimmäinen osa oli enemmän suunnittelutyötä tukeva sovellus, ja katselmoinnin toinen osa katselmointia tukeva sovellus. Erilaisilla sovelluksilla haluttiin selvittää mahdollisimman laajasti lisätyn todellisuuden tarjoamaa hyötyä suunnittelukatselmointiin liittyen. Molemmissa sovelluksissa hyödynnettiin tutkimuskäytössä olevan Avant 635 -työkonteen 3D-malleja. Työkonetta käytetään GIM-hankkeessa, jossa tutkitaan ja kehitetään autonomisesti toimivia työkonetta ja palvelurobotiikkaa (GIM 2011).

4.2. Laitteisto ja ohjelmat

Lisätyn todellisuuden sovelluksen toteuttamiseksi markkinoilla on tarjolla runsaasti erilaisia vaihtoehtoja. Tässä työssä keskityttiin vaihtoehtoihin, jotka ovat edullisia mutta tarjoavat kuitenkin tarpeeksi hyvät ominaisuudet. Taulukossa 3 on lueteltu katselmoinnissa käytetty laitteisto. Huomattavaa on, että kaikki käytetyt laitteet ja ohjelmat ovat suhteellisen edullisia ja yleisesti saatavilla olevia kaupallisia tuotteita. Näin ollen voitiin keskittyä käyttämään valmiita työkaluja ilman, että tarvitsi käyttää aikaa niiden kehittämiseen. Samasta syystä sovellukset ovat helposti toteutettavissa myös tutkimusympäristön ulkopuolella.

Taulukko 3. AR-katselmoinnissa käytetty laitteisto.

HMD-lasit	eMagin Z800
Videoprojektori	Epson EMP-82
Kamera	LifeCam Cinema 720p
Paikannus	Alvar for Virtools & paperimarkerit
Tietokone	Lenovo Z61p & X61
Ohjelma	Virtools 5.0

Kokonaiskustannus työssä käytetylle laitteistolle kaupallisiin tarkoituksiin on noin 10 000 euroa. Summassa ei ole huomioitu Alvar for Virtools -ohjelmapaketin lisensointikustannusta, joka määräytyy VTT:n kanssa tehdyn lisensointisopimuksen mukaan. Katselmointi toteutettiin Virtoolsilla, koska se oli hankittu käyttöön aikaisemmin, jolloin ohjelman käyttötaito oli valmiina. Virtoolsin vuoden kestävä lisensointi kaupallisiin tarkoituksiin maksaa noin 5 000 euroa. Ohjelmalla olisi voitu tietävästi käyttää myös Unifeye Design -ohjelmaa, jonka hinta on 1 500 euroa (Metaio 2010b). Tieto ohjelman toimivuudesta perustuu ilmaisversiolla tehtyihin testeihin, joten varmuutta ohjelman soveltuvuudesta tällaisen AR-katselmoinnin tekemiseen ei kuitenkaan ole.

4.2.1. Visualisointi

Visualisointilaitteina käytettiin HMD-laseja, videoprojektorin ja pienikokoista kannettavaa tietokonetta. HMD-lasit mahdollistivat todellisentuntuisen visualisoinnin yhdelle henkilölle kerrallaan. Videoprojektorin avulla sama kuva voitiin jakaa useammalle osallistujalle samanaikaisesti. Näiden lisäksi myös nopeasti yleistyvien tablet-tietokoneiden mahdollisuuksia arvioitiin pienikokoisella kannettavalla tietokoneella.



Kuva 25. Katselmoinnissa käytetyt HMD-lasit ja niihin kiinnitetty kamera.

Katselmoinnissa käytettiin kuvan 25 eMagin Z800 HMD-laseja. Ne ovat 2 000 euron hintaluokassa yhdet markkinoiden kilpailukykyisimmistä HMD-laseista kevyestä rakenteesta ja 800x600-pikselin resoluutiosta johtuen. Useimpien kilpailijoiden tuotteet tarjoavat vain 640x480-pikselin resoluution. Katselmointia varten lasihin kiinnitettiin myös kamera, jonka avulla toteutettiin videokuva todellisesta ympäristöstä. Samaa videokuvaa käytettiin markkereiden paikannukseen.



Kuva 26. Katselmoinnissa käytetty pienikokoinen kannettava tietokone.

Katselmoinnissa haluttiin selvittää alustavia tablet-tietokoneiden tarjoamia mahdollisuuksia. Tämä toteutettiin kuvan 26 ThinkPad X61 -tietokoneen avulla. Se on kevyt ja pienikokoinen kannettava tietokone, jonka paino on noin puolitoista kiloa. Uuden sukupolven tablet-tietokoneista poiketen tietokoneessa ei ole kosketusnäyttöä, joten tätä ominaisuutta ei päästy testaamaan.

4.2.2. Paikannus

Paperimarkkereihin pohjautuvaa paikannusta käytetään varsin yleisesti pienen mittakaavan AR-sovelluksissa, mutta laajaan ympäristöön sitä on sovellettu harvoin. Menetelmän ehdoton vahvuus on sen hinta. Paperimarkkerit ovat käytännössä ilmaisia, kun taas kilpaileviin tekniikoihin perustuvat paikannuslaitteistot maksavat vähintäänkin muutaman tuhat euroa.

Kuvassa 27 on katselmoinnissa käytetyt markkerikentät. Katselmoinnin ensimmäisessä osassa käytettiin työkoneneen katon kokoista markkerikenttää, joka koostui 24 markkerista. Lisäksi käytettiin viittä yksittäistä markkeria ohjausyksiköiden sijoittelua varten. Sovellukseen tarvittiin useita markkereita, jotta ainakin muutama yksittäinen markkeri oli jatkuvasti kameran näkökentässä. Esimerkiksi kuvan hetkellä 24 markkerista paikannukseen voitaisiin käyttää vain viittä. Muut markkerit ovat käsien tai yksittäisten markkereiden peittämiä.



Kuva 27. Katselmoinnissa käytetyt markkerikentät.

Katselmoinnin toisessa osassa hyödynnettiin huomattavasti suurempaa, kokoushuoneen seinään rakennettua markkerikenttää. Se koostui kahdeksasta A3-paperille tulostetusta markkerista. Suurikokoisella markkerikentällä haluttiin toteuttaa tarpeeksi laaja lisätyn todellisuuden ympäristö, jossa pienkuormaajan kokoista virtuaalimallia pystyttiin tarkastelemaan useamman metrin päästä.

Tarkka paikannus vaatii sen, että kameran näkökentässä on jatkuvasti vähintään yksi markkeri. Jos yhtään markkeria ei ole näkyvissä, työssä käytetty paikannusohjelma alkoi hyödyntää yksinkertaista markkeritonta paikannusta. Se oletti, että pelkästään kameran rotaatio muuttuu, mutta kamera pysyy muuten paikallaan. Näin ollen paikannus toimi jossain määrin, vaikka käyttäjä katsoi markkerikentän ulkopuolelle.

4.2.3. Ohjelmat

Visualisointi ja paikannus ovat lisätyn todellisuuden välttämättömiä elementtejä, mutta niiden yhdistämiseen tarvitaan tietokoneohjelma. Tätä kolmen elementin yhdistelmää kutsutaan tässä työssä AR-sovellukseksi. Viime vuosiin asti ainut tapa toteuttaa AR-sovellus oli ohjelmoida sellainen käsin AR-ohjelmakirjastoja hyödyntäen. Vuoden 2010 lopulla julkaistiin Virtools-ohjelmaan liitettävä Alvar for Virtools -ohjelmapaketti ja hieman aikaisemmin Unifeye Design -ohjelma. Näiden ohjelmien avulla lisätyn todellisuuden sovelluksia voidaan toteuttaa ilman ohjelmointitaitoa.

Tässä työssä sovellusten rakentamiseen käytettiin Virtoolsia ja Alvar for Virtools -ohjelmapakettia. Lisäosa on välttämätön Virtoolsissa, sillä ohjelma ei itsessään sisällä tarvittavia työkaluja AR-sovellusten toteuttamiseksi. Lisäosan avulla saadaan käyttöön

Virtoolsin laaja lohkokirjasto, jonka avulla voidaan rakentaa erilaisia lisätyn todellisuuden sovelluksia nopeasti.

Ohjelman avulla sovelluksesta rakennetaan juuri sellainen kuin halutaan. Voidaan esimerkiksi kiinnittää tiettyjä virtuaalimalleja tietyille markkereille tai simuloida koneen toimintaa näppäimistöllä ohjaten. Virtoolsin avulla voidaan rakentaa todellista käyttötilannetta vastaava virtuaalinen käyttötilanne, jossa testataan koneen tai laitteen toimintaa todelliseen tapaan. Sovellusmahdollisuuksia on lähes rajattomasti. Tulee kuitenkin muistaa, että mitä enemmän sovellukseen tehdään toiminnallisuutta sitä enemmän toteuttaminen vie myös aikaa.

4.2.4. Tietokone

Tietokonetta tarvittiin sovelluksen rakentamiseen ja ohjaukseen. Tässä työssä molemmat AR-katselmoinnin sovelluksista toteutettiin kannettavalla ThinkPad Z61p -tietokoneella. Katselmoinnin toisessa osassa hyödynnettiin lisäksi pienikokoista ThinkPad X61 -tietokonetta. Tietokoneiden ominaisuudet on esitetty taulukossa 4. Pienikokoisessa X61-koneessa on huomattavaa, että näytönohjain on integroitu suoraan emolevyyn. Tämän johdosta paikannuksessa hyödynnettävä laskentateho on merkittävästi Z61p-konetta alhaisempi.

Taulukko 4. Katselmoinnissa käytettyjen tietokoneiden ominaisuudet.

Malli	Lenovo ThinkPad Z61p	Lenovo ThinkPad X61
Proessori	Intel Core Duo T7200 (2.0GHz)	Intel Core Duo T7300 (2.0GHz)
Muisti	2GB	2GB
Näytönohjain	512MB ATI FireGL V5250	Intel X3100
Käyttöjärjestelmä	Windows XP Professional	Windows 7 Enterprise

Tietokoneen tehokkuuden ja tarvittavan laskentatehon määrä ei ole täysin yksinkertainen asia. Markkereiden koon, resoluution, paikannusohjelman ja tietokoneen välillä on varsin mielenkiintoinen yhteys. Paikannusohjelma vaatii ensinnäkin laskentatehoa tietokoneelta, jotta se voi etsiä mahdollisimman nopeasti kuvassa näkyvät markkerit ja määrittää niiden paikan ja orientaation. Paikannusohjelman vaatima laskentateho riippuu näin ollen käytetystä resoluutiosta ja markkereiden määrästä.

Useampi markkeri ja korkeampi resoluutio vaativat siis enemmän tehoa, sillä analysoitavia kuvapisteitä on tällöin enemmän. Käytännössä laskentatehon lisääminen mahdollistaa suuremman resoluution käytön, joka taas mahdollistaa pienemmät markkerit tai vaihtoehtoisesti kameran etäisyys markkereihin voi olla pidempi. Suuremmasta laskentatehon tarpeesta johtuen paikannukseen käytettiin 800x600-resoluutiota vaikka kamera olisi pystynyt tarjoamaan myös 1024x720-resoluution.

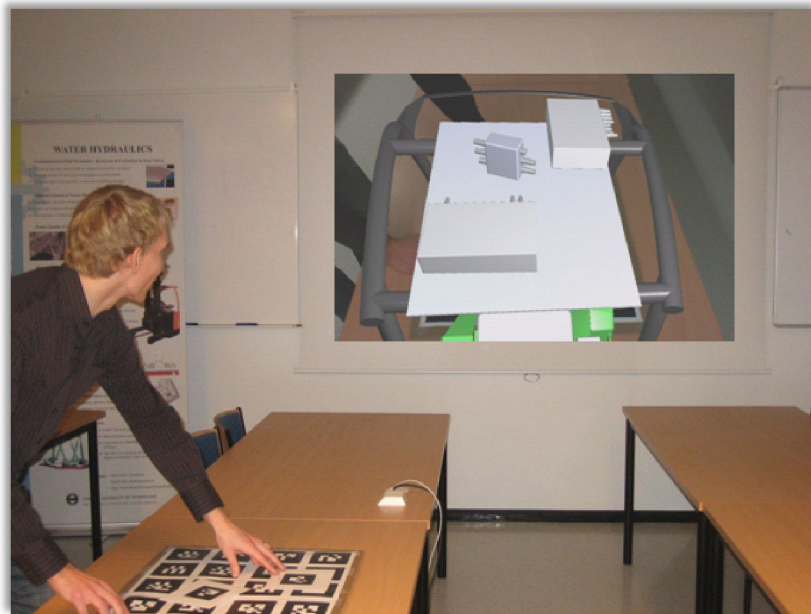
4.3. AR-katselmointi

AR-katselmointi koostui kahdesta osasta. Ensimmäisessä osassa tavoitteena oli sijoittaa viisi ohjausyksikköä mahdollisimman optimaalisesti autonomisen työkonteen katolle. Ohjausyksiköt sisältävät ohjausjärjestelmän komponentteja, joten sijoittelun vaatimuksena oli niihin menevien johtojen mahdollisimman helppo käsittely. Katselmoinnin toisessa osassa käyttäjien tavoitteena oli saada mahdollisimman hyvä yleiskuva AR-ympäristöön visualisoidusta työkonesta. Katselmointi toteutettiin normaalissa kokoushuoneessa kahdessa viiden henkilön testiryhmässä. Yhden katselmoinnin kesto oli noin puolitoista tuntia. Tämän jälkeen suoritettiin yksilöhaastattelut käyttäjäkokemusten keräämiseksi.

4.3.1. Ohjausyksiköiden sijoittelu

AR-katselmoinnin ensimmäisessä osassa testattiin uudenlaista suunnittelua tukevaa työkalua. Sen avulla voitiin liikutella ja testata viiden ohjausyksikön optimaalista sijoittelua. Sovelluksessa todellisessa koossa oleva virtuaalinen työkonteen katto oli kiinnitetty markkerikenttään, joka koostui 24 markkerista. Yksittäisiä ohjausyksiköitä pystyi liikuttamaan omilla markkereilla. Kuvassa 28 käyttäjä testaa kolmella ohjausyksiköllä eri vaihtoehtojen järkevyyttä.

Ohjausyksiköitä voitiin siirrellä myös yhtä aikaa. Tämä mahdollisti eri vaihtoehtojen nopean vertailun. Yksinkertaisen käyttöliittymän avulla kaikki pystyivät tekemään suunnittelutyötä ilman vaatimusta CAD-ohjelman käyttötaidosta. Kuvan tilanteesta poiketen käyttäjiä kannustettiin ryhmätyöhön, jotta eri asiantuntijoiden erilaiset näkemykset tulivat paremmin huomioiduksi. Visualisointilaitteena käytettiin normaalia videoprojektoria.



Kuva 28. Käyttäjä asettelee kolmea ohjausyksikköä työkonteen katolle.

Lähtötilanteessa todellisen kokoinen työkoneen virtuaalimalli oli paikoitettu siten, että sen katto oli markkerikentän tasolla. Näin katolla olevia ohjausyksiköitä oli helppo liikutella. Ohjausyksikön pystyi jättämään haluamalleen paikalle peittämällä ja poistamalla sitä ohjaavan markkerin. Työkoneen virtuaalimallia pystyi liikuttamaan ja skaalaamaan näppäimistön avulla, jolloin se voitiin nostaa esimerkiksi kokonaan markkerikentän yläpuolelle. Markkerikenttää ei kuitenkaan ollut suunniteltu suurikokoisen työkoneen yleiskatselmointia varten, joten virtuaalimallia täytyi samalla pienentää. Näin ollen koko koneen tarkastelu todellisessa koossa ei ollut tällä sovelluksella mahdollista.

Sovellusta voidaankin luonnehtia suunnittelun aputyökaluksi tai ryhmäsuunnittelutyökaluksi. Se tarjoaa uuden tavan suunnittelun ja katselmoinnin yhdistämiseen. Testikatselmoinnilla haluttiin selvittää, minkälaista lisäarvoa se tarjoaa perinteisen suunnitteluohjelman käyttöön verrattuna. Ominaisuuksien perusteella voidaan sanoa, että sovellus tarjoaa ainakin helpon käyttöliittymän, jonka avulla kuka tahansa voi osallistua suunnitteluun. Samalla ryhmätyön tekeminen helpottuu.

4.3.2. Visualisointiympäristö

Katselmoinnin toisessa osassa todellisen kokoinen virtuaalimalli työkoneesta oli paikoitettu kokoushuoneen lattialle. Käyttäjää pyydettiin tarkastelemaan huoneeseen visualisoitua työkoneita mahdollisimman monipuolisesti. Tavoitteena oli selvittää käyttäjien mielipiteitä järjestelmän toimivuudesta ja käytön miellyttävyydestä. Paikannus toteutettiin kahdeksasta markkerista koostuneen markkerikentän avulla. Suurikokoinen markkerikenttä mahdollisti todellisessa koossa olevan virtuaalimallin tarkastelemisen eri kulmista useamman metrin päästä. Virtuaalimallia voitiin siirrellä näppäimistön avulla.



Kuva 29. Käyttäjä tarkastelee todellisen kokoista virtuaalimallia. Käyttäjän näkymä on pienessä kuvassa.

Kuvassa 29 käyttäjä tarkastelee kokoushuoneeseen visualisoitua työkonetta HMD-lasien avulla. Muut osallistujat pystyivät seuraamaan käyttäjän näkymää videoprojektorin heijastamasta kuvasta. Tässä vaiheessa testattiin myös pientä kannettavaa tietokonetta, jonka avulla sama näkymä voitiin jakaa useammalle henkilölle yhtä aikaa. Tällä haluttiin selvittää alustavia mielipiteitä tablet-tietokoneiden hyödyllisyydestä. Pienen tietokoneen näytönohjaimen teho riitti päivittämään kuvaa vain neljä kertaa sekunnissa, jonka johdosta videokuva oli hieman nykivää. HMD-laseilla päivitystaajuus oli noin yhdeksän kertaa sekunnissa, jolloin liikkeet olivat huomattavasti sulavampia.

Sovelluksessa oli mahdollista tarkastella ja liikutella katselmoinnin ensimmäisessä osassa sijoitettuja ohjausyksiköitä ja kahta katolle asennettavaa lasermittauslaitetta, joita käytetään hyväksi työkonteen autonomiseen liikkumiseen. Etukauha oli lisäksi mahdollista vaihtaa trukkipiikeillä nostettavaksi vesisäiliöksi. Tämän avulla haluttiin etsiä mahdollisimman hyvä paikka lasermittauslaitteille, jotta toimintavarmuus olisi tarpeeksi korkea erilaisissa työtilanteissa.

Tällaisella kokoushuoneeseen toteutetulla visualisointiympäristöllä voidaan tarkastella työkonetta suurempiakin virtuaalimalleja, mutta tällöin tarkastelualue kannattaa keskittää markkerikentän lähelle. Jos tarkasteltaisiin esimerkiksi kokonaista paperikonetta, sitä kannattaisi tarkastella muutaman metrin levyinen pala kerrallaan ja liikuttaa konetta sivusuunnassa. Visualisointiympäristö on mahdollista rakentaa myös tehdashalliin, jolloin suurempi tila tekee suurempien mallien visualisoinnista todellisemman tuntuisen. Paikannuksen epätarkkuudesta johtuen kauimpana olevat mallin osat heiluvat eniten, jonka takia suurten mallien kohdalla kannattaa käyttää suurempia markkereita tai suurempaa paikannusresoluutiota.

4.4. Toteutus

AR-katselmoinnin toteutus koostui suurimmaksi osaksi lohkokaavioilla tehtävästä sovellusten toiminnallisuudesta sekä markkerikenttien suunnittelusta ja rakentamisesta. Kuvassa 30 on esitetty AR-katselmoinnin vaatimat tehtävät. Alkuvalmisteluihin kuuluivat neljä ensimmäistä kohtaa katselmoinnin suunnittelusta kameran kalibrointiin. Tämän jälkeen aloitettiin varsinainen katselmoinnin toteutus, joka koostui sovellusten toteuttamisesta Virtoolsilla ja markkerien tekemisestä.



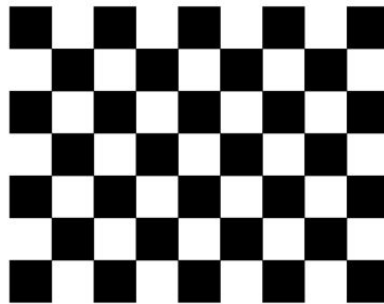
Kuva 30. Prosessikuvaus AR-katselmoinnin toteutuksesta.

Katselmoinnin suunnitteluun kuului kohteen valinta ja sovellusten ominaisuuksien hahmottelu. Suunnittelun jälkeen aloitettiin itse toteutusvaihe. Aluksi mallinnettiin puuttuvat osat eli autonomisen työkonteen katolle sijoitettavat ohjausjärjestelmän yksiköt. Mallinnus tehtiin SolidWorks-ohjelmalla, josta CAD-mallit vietiin 3dxml-

muodossa Virtoolsiin. 3dxml-tiedostomuoto on Dassault Systèmesin käyttämä kevyt 3D-tiedostomuoto. CAD-mallien muuttaminen virtuaaliohjelmassa toimiviksi virtuaalimalleiksi on erittäin nopeaa, jos käytetään saman ohjelmistoyrityksen tuotteita. Jos joudutaan tekemään useampia tiedostomuunnoksia, malleista saattaa kadota yksittäisiä osia. Suuria ja raskaita CAD-malleja voidaan joutua lisäksi keventämään, jotta tietokoneen laskentateho riittää päivittämään sovellusta tarpeeksi nopeasti.

4.4.1. Kameran kalibrointi

Tarkka paikannus vaatii mahdollisimman tarkasti kalibroidun kameran. Kameran kalibrointi täytyy tehdä yhden kerran samoja asetuksia kohden. Jos esimerkiksi resoluutiota tai kameran polttoväliä muutetaan, kalibrointi pitää tehdä uudestaan. Tässä työssä kalibrointi tehtiin Alvar for Virtools -ohjelmapakettiin sisältyvällä kalibrointiohjelmalla.



Kuva 31. Kalibrointiin käytetty kuvio.

Ohjelma hyödyntää kuvan 31 kalibrointikuvioita. Kalibrointi aloitetaan valitsemalla käytetty resoluutio ja muutamia muita kameran ominaisuuksia, jonka jälkeen kameralla kuvataan kalibrointimarkkeria eri kulmista. Kun ohjelma on saanut tarpeeksi kuvia, se muodostaa xml-muotoisen kalibrointitiedoston ennalta määrättyyn tiedostopolkuun. Tiedoston avulla AR-sovellus osaa huomioida mahdolliset kameran virheet ja paikannuksesta tulee tarkempi.

4.4.2. Markkerien toteutus

Yksittäiset markkerit ja tulostusarkille mahtuvat markkerikentät voidaan tehdä Alvar for Virtools -ohjelmapakettiin sisältyvällä markkerinteko-ohjelmalla. Ohjelmalle kerrotaan markkerin numero ja sijainti, jonka jälkeen se muodostaa automaattisesti pdf-tiedoston ja sitä vastaavan xml-tiedoston markkereiden sijainnista. Xml-tiedoston perusteella AR-sovellus tietää missä markkerit sijaitsevat, ja osaa päivittää virtuaalimallin sijainnin oikein. Tulostusaluetta suuremmat markkerikentät pitää tehdä käsin, jolloin myös markkereiden paikat täytyy määrittää manuaalisesti xml-tiedostoon. Tiedosto voidaan toteuttaa esimerkiksi Windowsin Notepad-ohjelmalla.

```

<multimarker markers="8">
  <marker index="10" status="1">
    <corner x="0.000000" y="40.700000" z="0.000000" />
    <corner x="10.000000" y="40.700000" z="0.000000" />
    <corner x="10.000000" y="50.700000" z="0.000000" />
    <corner x="0.000000" y="50.700000" z="0.000000" />
  </marker>
  <marker index="11" status="1">
    <corner x="1.000000" y="0.000000" z="0.000000" />
    <corner x="11.000000" y="0.000000" z="0.000000" />
    <corner x="11.000000" y="10.000000" z="0.000000" />
    <corner x="1.000000" y="10.000000" z="0.000000" />
  </marker>
</multimarker>

```

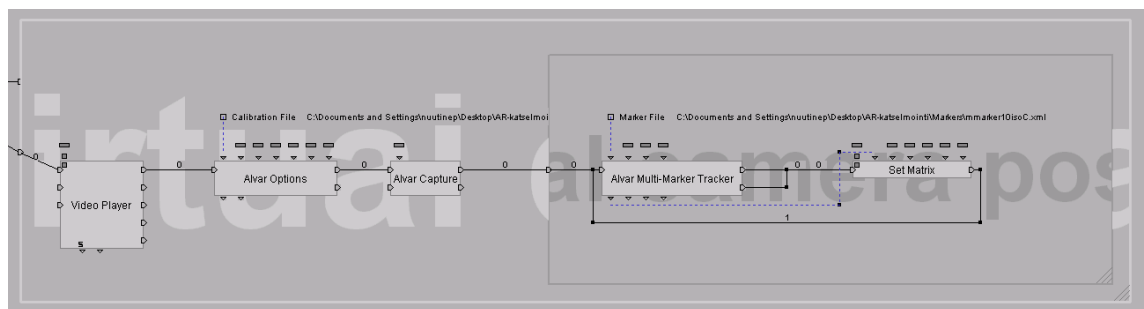
Kuva 32. Osa markkerikentän määrittystiedostoa.

Kuvassa 32 on osa AR-katselmoinnissa käytetystä xml-tiedostosta, joka määrittää markkereiden 10 ja 11 sijainnit kokoushuoneen seinälle tehdyssä markkerikentässä. Jokaista yksittäisen markkerin kulmaa kohden määritetään x-, y- ja z-komponentti. Käytetyn yksikön suuruus voidaan valita vapaasti. Tässä esimerkissä yhden markkerin leveys asetettiin kymmeneksi yksiköksi, jolloin yksi yksikkö vastasi 2,61cm. Kuvan määrittystiedostosta nähdään esimerkiksi markkereiden korkeusero, joka on 40,7 yksikköä eli 1,06m.

Markkerien paikat kannattaa määrittää mahdollisimman tarkasti, jotta virtuaalimalli pysyisi mahdollisimman vakaasti paikallaan. Jos markkerit ovat eri kohdassa kuin tiedostossa on määritetty, virtuaalimalli liikkuu hieman markkereiden vaihtuessa kameran näkökentässä. AR-katselmoinnin visualisointisovelluksessa markkereiden paikat saatiin määritettyä noin senttimetrin tarkkuudella. Virhe oli suurimmillaan oikeassa reunassa, sillä virtuaalimalli heilahti hieman, kun paikannus käytti pelkästään oikealla olevia markkereita.

4.4.3. Sovellusten toiminnallisuus

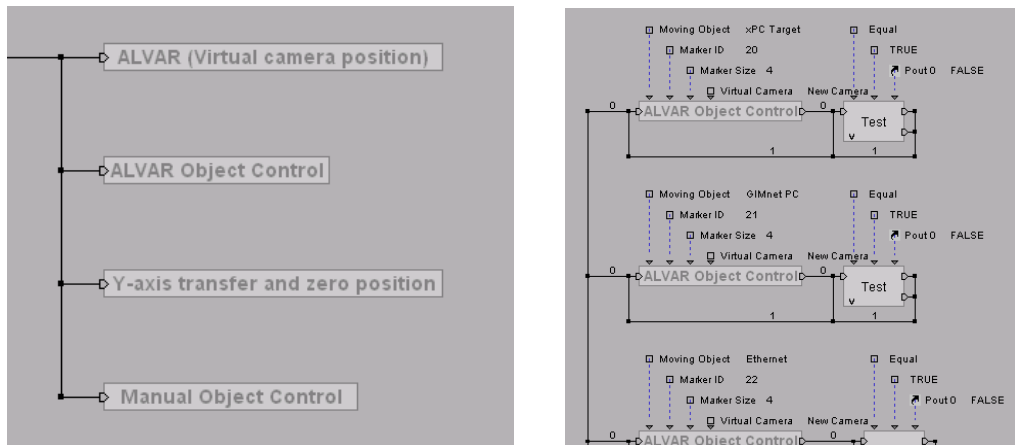
Sovellusten toiminnallisuus toteutettiin Virtoolsin avulla. Ohjelmassa käytetään lohkokaavioihin perustuvaa toiminnallisuuksien mallinnusta. Markkereihin perustuva paikannus pohjautui VTT:n kehittämään Alvar for Virtools -ohjelmapakettiin, joka tuo lisätyn todellisuuden ominaisuuksia Virtoolsiin. Sen avulla ohjelmassa voidaan käyttää kuutta lisälohkoa, joilla voidaan toteuttaa markkereiden ja markkerikenttien paikannus.



Kuva 33. Paikannukseen käytetty lohkokaavio.

Kuvassa 33 on käytössä viisi lisälohkoa, joiden avulla AR-katselmoinnissa käytetty markkerikenttä ja virtuaalimalli paikannettiin. Kolme ensimmäistä lohkoa ovat päällä

vain kerran käynnistyksen yhteydessä, kun taas kaksi viimeistä toimivat jatkuvasti päivitystaajuuden tahtiin. Kameran kalibrointitiedosto annetaan toisena olevalle Alvar Options -lohkolle ja markkerikentän määritystiedosto jatkuvasti toiminnassa olevalle Alvar Multi-Marker Tracker -lohkolle. Päivitystaajuus riippuu tietokoneen laskentatehosta, markkereiden määrästä sekä virtuaalimallin tarkkuudesta ja tiedostokoosta. Esimerkiksi visualisointisovelluksessa päivitystaajuus tehokkaammalla tietokoneella oli noin yhdeksän kertaa sekunnissa.



Kuva 34. Ohjausyksiköiden sijoitteluun vaaditut päälohkot ja yhden päälohkon sisältöä.

Kuvassa 34 on neljä päälohkoa, joista AR-katselmoinnin ensimmäinen osa koostui. Päälohkojen tarkoitus on yksinkertaisesti selkeyttää lohkoakaaviota ja niitä voidaan tehdä ja nimetä vapaasti. Oikealla on avattuna toiseksi ylin päälohko, jonka sisältämä lohkoakaavio sitoo ohjausyksikön yksittäiseen markkeriin. Test-lohko piilottaa ohjausyksikön näkyvistä, jos siihen sidottu markkeri ei ole näkyvissä. AR-katselmoinnin toisessa osassa käytettiin vain vasemman kuvan ylintä ja alinta päälohkoa.

4.4.4. Ajankäyttö

AR-katselmoinnin toteutukseen kului aikaa noin kuusi työpäivää. Taulukkoon 5 on eritelty eniten aikaa vieneet vaiheet. Suurin osa ajasta kului lohkoakaavioilla tehtävään toiminnallisuuksien toteuttamiseen. Katselmoinnin ensimmäinen sovellus sisälsi enemmän toiminnallisuutta, joten sen toteuttaminen vaati enemmän lohkoakaaviomallinnusta ja vei enemmän aikaa. Toinen sovellus oli yksinkertaisempi ja lisäksi siinä voitiin hyödyntää ensimmäisen sovelluksen lohkoakaavioita. Sovellusten keskinäinen ajankäyttö jakaantui siten, että ensimmäisen sovelluksen toteutus vei aikaa noin neljä päivää ja toisen kaksi päivää.

Taulukko 5. Katselmoinnin toteutukseen kulunut aika.

Toiminta	Käytetty aika (h)
Puuttuvien osien mallinnus	4
Virtools-mallinnus <ul style="list-style-type: none"> Ohjausyksikkösovellus 80% Visualisointisovellus 20% 	30
Markkerien tekeminen	8
Yhteensä	42

Samantyyppisten sovellusten toteuttaminen uudelleen olisi huomattavasti nopeampaa, koska vanhoja lohkokaavioita voitaisiin hyödyntää tehokkaasti. Ensimmäisellä kerralla lohkokaavioiden rakentaminen on suhteellisen hidasta, koska samalla pitää miettiä, millä lohkoilla tarvittava toiminnallisuus voidaan toteuttaa. Yksinkertaisten lohkokaavioiden kohdalla tämä ei vie paljoa aikaa, mutta monimutkaisempia lohkokaavioita joudutaan usein muokkaamaan, jotta ne tekevät vain ja ainoastaan halutun toiminnallisuuden.

Pelkän virtuaalimallin muuttaminen sovellukseen on yleensä nopeaa. Esimerkiksi visualisointiympäristöön voitaisiin tuoda hetkessä uusi 3D-malli, jos markkerikenttä olisi valmiina. Markkerikentän tekeminen uuteen tilaan kestäisi muutaman tunnin. Visualisointiympäristö on siis mahdollista pystyttää lähes minne tahansa yhden päivän aikana. Pystytysaika lyhenee entisestään, jos käytetään esimerkiksi postereihin tulostettuja markkereita. Ohjausyksikkösovellukseen voitaisiin vaihtaa uudet virtuaalimallit muutamassa tunnissa. Aikaa saattaa mennä kuitenkin huomattavasti enemmän, jos sovelluksen toiminallisuutta muutetaan.

Täysin uuden sovelluksen toteuttamiseen vaadittavaa aikaa on vaikea arvioida. Toteutuksen aikana ilmenee usein yllättäviä, etukäteen tuntemattomia asioita, jotka vaativat vaihtelevan määrän aikaa. Perussääntönä voidaan kuitenkin sanoa, että uudenlaisen ja paljon ominaisuuksia vaativan sovelluksen toteuttaminen vie useampia päiviä tai jopa viikkoja. Toisaalta vanhaa sovellusta hyödyntämällä voidaan uusi sovellus toteuttaa muutamassa tunnissa.

5. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Työssä saavutettiin useita tuloksia, joista osa on täysin uusia ja osa aikaisempien tutkimusten mukaisia. Työssä selvitettiin lisätyn todellisuuden hyödyntämisen vaatimuksia ja kerättiin käyttäjäkokemuksia toteutettujen katselmointisovellusten laadun ja hyväksyttävyyden selvittämiseksi. Tapaustutkimuksessa toteutetun AR-katselmoinnin perusteella voidaan todeta, että lisätty todellisuus tarjoaa lisähyötyä ja uusia mahdollisuuksia perinteiseen katselmointiin ja suorituskäytössä laitteistolla toteutettuun katselmointiin verrattuna.

5.1. Vaatimukset edullisen AR-katselmoinnin toteuttamiseksi

Yhtenä työn tavoitteena oli selvittää mitä vaatimuksia lisättyä todellisuutta hyödyntävän katselmoinnin toteuttaminen asettaa. Erilaisia AR-sovelluksia on kehitetty runsaasti, mutta suurin osa on toteutettu jostain ohjelmointikieltä käyttämällä. Tässä työssä toteutettu AR-katselmointi toteutettiin Virtools-ohjelman ja VTT:n kehittämän Alvar for Virtools -ohjelmapaketin avulla. Kyseinen ohjelmakokoonpano mahdollistaa lisätyn todellisuuden sovellusten kehittämisen ilman minkään ohjelmointikielen hallintaa. Tämä on tärkeä asia, jotta lisätyn todellisuuden sovellukset leviävät ohjelmointitaitoisten keskuudesta teollisuuden eri aloille. Helppo kehitysympäristö on avainasemassa teknologian hyödyntämisen lisääntymisessä ja sen leviämisessä.

Toinen merkittävä asia on mahdollisuus toteuttaa AR-katselmointi pelkästään kaupallisten ohjelmien avulla. Tutkimusprojekteissa kehitetään usein omia ohjelmia, joiden elinkaari päättyy liian usein projektin elinkaaren mukana. Tässä työssä hyödynnettiin olemassa olevia kaupallisia ohjelmia, joita kehitetään ja ylläpidetään tutkimusprojekteista riippumattomasti. Tällaisia ohjelmia käyttämällä haluttiin varmistaa se, että työssä toteutettu järjestelmä voidaan kopioida mahdollisimman helposti tutkimusympäristön ulkopuolelle.

Sovelluksen kehittäminen vaatii aikaa. Jos toteutetaan AR-katselmoinnin ensimmäisen osan tapainen suunnittelutyötä tukeva työkalu, toteutus vie aikaa useamman päivän. Tällöin tulee miettiä, tuleeko sovellus tarjoamaan niin paljon lisähyötyä, että se kannattaa kehittää. Tällaisia tilanteita voivat olla esimerkiksi loppukäyttäjien mukaan ottaminen suunnitteluprosessiin. Työssä kehitetty visualisointiympäristö voidaan sen sijaan pystyttää päivässä lähes minne tahansa. Sovelluksen vaatima markkerikenttä voidaan jättää pysyvästi paikoilleen, jolloin todellisen kokoinen 3D-malli voidaan visualisoida muutamassa minuutissa. Tällainen nopeasti pystytettävä visualisointiympäristö tarjoaa aivan uusia mahdollisuuksia

tuotesuunnitelmien ja valmiiden tuotteiden visualisoimiseksi yrityksen sisäisille ja ulkoisille asiakkaille.

5.2. Käyttäjäkokemukset AR-katselmoinnista

Käyttäjien kokemuksia kerättiin kahdessa AR-katselmoinnissa, joihin osallistui yhteensä kymmenen henkilöä. Tällä haluttiin selvittää AR-katselmoinnin käytettävyyttä ja hyväksyttävyyttä käyttäjien näkökulmasta. Testiryhmä koostui autonomisen koneen kehitystyötä tekevistä asiantuntijoista sekä teollisuuden ja VTT:n edustajista. Katselmointi koostui kahdesta erillisestä sovelluksesta ja kokonaiskesto oli noin puolitoista tuntia. Katselmoinnin jälkeen jokainen osallistuja haastateltiin liitteen 1 haastattelulomakkeen avulla.

Katselmoinnin ensimmäisessä osassa käyttäjien tehtävänä oli sijoittaa autonomisen työkonen katolle suunnitellut ohjausyksiköt mahdollisimman hyvälle paikalle, jotta niihin meneviä johtoja olisi mahdollisimman helppo käsitellä (ks. kappale 4.3.1.). Käyttäjien mielestä sovelluksen suurin vahvuus oli yksinkertainen ryhmätyötä tukeva käyttöliittymä. Tämä mahdollisti kaikkien käyttäjien osallistumisen, ilman mitään vaatimusta CAD-ohjelman käyttötaidosta. Huonona puolena mainittiin ohjausyksiköiden karkea ulkonäkö ja ohuilla markkereilla tapahtuvan ohjauksen vaikeus. Pientä osaa häiritsi katsominen eri suuntaan missä omat kädet olivat. Tämä johtui siitä, että ohjausyksiköiden liikuttaminen tapahtui pöydällä olevien markkereiden avulla ja visualisointi toteutettiin videoprojektorilla heijastetun kuvan avulla. Kehitysideoita tällaiselle lähellä suunnittelua olevalle sovellukselle keksittiin useita. Esimerkiksi erilaisten osakokoonpanojen vertailu konseptivaiheessa voitaisiin toteuttaa eri markkereilla, jolloin vaihtoehtojen vertailu olisi helppoa ja nopeaa.

Toisessa osassa käyttäjät arvioivat mahdollisimman monipuolisesti lisätyn todellisuuden avulla luotua visualisointiympäristöä, jossa todellisen kokoinen virtuaalimalli visualisoitiin kokoushuoneen lattialle (ks. kappale 4.3.2.). Järjestelmää testattiin HMD-laseilla ja pienikokoisella kannettavalla tietokoneella. Lasit tarjosivat todellisentuntuisen visualisoinnin yhdelle henkilölle, kun taas kannettava tietokone mahdollisti visualisoinnin useammalle henkilölle yhtä aikaa. Sovelluksessa arvostettiin erityisesti todellisen kokoista virtuaalimallia ja mahdollisuutta liikkua ja havainnoida virtuaalimallia luonnollisesti. Näiden ominaisuuksien ansiosta kokonaisuus hahmottui nopeasti. Sovellusta kuvailtiin vaikuttavaksi ja yllättävän hyväksi kustannukset ja muut vaatimukset huomioon ottaen.

Suurimpana heikkoutena pidettiin HMD-lasien johdon aiheuttamaa liikkuvuuden rajoittumista ja virtuaalimallin pientä heilahtelua silloin, kun paikannettava markkeri vaihtui kameran näkökentässä. Kannettavaa tietokonetta pidettiin langattomuuden ja ryhmätyöhön sopivuuden takia hyvänä vaihtoehtona HMD-laseille. Erillisen näytönohjaimen puuttumisen takia kannettava tietokone ei kuitenkaan riittänyt päivittämään kuvaa tarpeeksi nopeasti. Heikkoutena mainittiin myös se, että yhdelle seinälle tehty markkerikenttä ei mahdollistanut virtuaalimallin kiertämistä itse

liikkumalla vaan mallia piti kääntää näppäimistöllä. Lisäksi yksittäiset markkerit olivat varsin kaukana toisistaan, jolloin virtuaalimallin lähitarkastelu oli vaikeaa, koska markkerin kadotessa näkökentästä, paikannus heikkeni huomattavasti. Suurimmat kehityskohteet liittyivät markkerikentän laajentamiseen ja HMD-lasien johdottomuuteen ja keventämiseen.

5.3. Vertailu vaihtoehtoihin menetelmiin

Työssä toteutettu AR-katselmointi tarjoaa uuden tavan suunnittelukatselmoinnin tukemiseksi. Perinteisesti suunnittelukatselmoinnissa on hyödynnetty CAD-ohjelmaa 3D-mallin tarkasteluun. Toisaalta todellisen kokoinen virtuaalimalli on voitu jo aikaisemmin visualisoida kalliimmalla laitteistolla tutkimusympäristössä. AR-katselmointi sijoittuu näin ollen perinteisen katselmoinnin ja suorituskykyisellä laitteistolla toteutetun katselmoinnin väliin, jolloin ne tarjoavat hyvän vertailukohdan.

5.3.1. Perinteinen katselmointi

Perinteisenä katselmointina pidetään tilannetta, jossa 3D CAD -mallia tarkastellaan videoprojektorin avulla kokoushuoneessa katselmointiryhmän kesken. Tällaisessa tilanteessa katselmoitava kohde on heijastettu projektorikankaalle ja osallistujat seuraavat mallia omilta paikoiltaan. Mallia esitellään suoraan CAD-ohjelman avulla, jolloin muutokset voidaan tehdä suoraan katselmoinnissa. Todennäköisempää on kuitenkin jättää pyyntö muutostarpeesta, jotta muodostuu raportti mitä on muutettu ja miksi.

Perinteisessä katselmoinnissa käytetyn CAD-ohjelman käytetyin ominaisuus lienee zoomaus-työkalu. Sen avulla mallia loitonnetaan kokonaisuuden hahmottamiseksi ja lähennetään yksityiskotien näkemiseksi. Lisäksi mallia pyöritellään CAD-ohjelman omassa maailmassa. Tämä johtaa siihen, että katselmointi suoritetaan vaihtelevan kokoisien 3D-mallin avulla, joka sijaitsee projektorikankaalla. Tällöin voi olla vaikeuksia hahmottaa suunnitelman todellista kokoluokkaa ja on olemassa riski, että suunnitelma jää jollekin hieman etäiseksi.

AR-katselmoinnissa virtuaalimalli voidaan visualisoida todellisessa koossa kokoushuoneen lattialle, jolloin kokoluokka hahmottuu taustalla näkyvän ympäristön avulla. Katselmoitavaa kohdetta tarkastellaan liikkumalla itse virtuaalimallin ympärillä, kuten katselmoitaisiin todellista tuotetta. Toiminnallisuutta ja erilaisia ominaisuuksia voidaan toteuttaa juuri niin paljon kuin halutaan. Lisätyn todellisuuden avulla voidaan kehittää myös sovellus, jonka avulla suunnittelua voidaan tehdä ilman CAD-ohjelman käyttöä. Tämä mahdollistaa osaamistaustaltaan erilaisten henkilöiden tehokkaamman osallistumisen suunnittelutoimintaan.

5.3.2. AR-katselmointi suorituskyykyisellä laitteistolla

Suorituskyykyisellä laitteistolla tehdyn AR-katselmoinnin perusteella tiedettiin, että todellisen kokoinen virtuaalimalli tarjoaa lisäarvoa perinteiseen katselmointiin nähden (ks. kappale 3.4.). Käyttäjien mielestä kokonaisuuden hahmottaminen oli perinteistä tapaa helpompaa ja nopeampaa. Suorituskyykyisessä laitteistossa käytettiin infrapunakameroihin perustuvaa paikannusta, joka on erittäin tarkka, mutta samalla kustannuksiltaan korkea. Edullisessa laitteistossa hyödynnettiin lähes ilmaista paperimarkkereihin perustuvaa menetelmää. Muita perustoimintaan liittyviä eroja laitteistojen välillä ei ollut.

Tarkemman paikannuksen avulla lattialle lisätty virtuaalimalli pysyi vakaammin paikallaan, jolloin virtuaalimalli vaikutti todellisemmalta. Katselmoitava kohde oli mahdollista kiertää ympäri ja sitä pystyi katselemaan vapaasti eri kulmista. Edullisessa laitteistossa kameran tuli nähdä jatkuvasti vähintään yksi markkeri, jotta paikannus oli tarkka. Tämä aiheutti sen, että edullisella laitteistolla katse oli pidettävä jatkuvasti markkerikenttää kohden ja virtuaalimalli heilahteli ajoittain. Tarkkuuserosta huolimatta käyttäjän liikkumisalue oli molemmilla laitteistoilla samaa luokkaa.

Edullisen laitteiston huomattavana etuna on sen helppo siirrettävyys. Markkerikenttä voidaan siirtää helposti tai niitä voidaan tehdä useampia eri tiloihin, jolloin todellisen kokoinen virtuaalimalli voidaan visualisoida edullisesti ja nopeasti lähes minne tahansa. Suorituskyykyisen laitteiston infrapunakamerat tulee sen sijaan kalibroida ja asentaa siirtämisen jälkeen, joka tekee kalliimman laitteiston siirtämisestä työlästä.

Kustannusten kannalta paperimarkkereihin perustuva laitteisto on huomattavasti edullisempi. Hankintakustannukset ovat noin kymmenesosan kalliimman laitteiston kustannuksista. Käyttökustannukset ovat molemmilla laitteistoilla samaa luokkaa. Sovellukset toteutettiin samalla ohjelmalla, joten toteuttamiseen käytetty aika oli molemmissa katselmoinneissa noin yksi miestyöviikko. Jos katselmoinnit tehtäisiin uudelleen, toteutukseen menisi aikaa yhdestä kahteen päivää. Yhteenvetona voidaan sanoa, että edullinen laitteisto on riittävä joihinkin tilanteisiin mutta se ei tarjoa yhtä laajoa sovellusmahdollisuuksia kuin suorituskyykyinen laitteisto.

5.4. Lisätyn todellisuuden tarjoama hyöty

Lisätyn todellisuuden avulla voidaan parantaa visualisointia ja saavuttaa luonnollisempi vuorovaikutus suunniteltavan tuotteen ja suunnittelijoiden välille. Työssä osoitettiin, että todellisen kokoinen virtuaalimalli on mahdollista visualisoida osaksi suunnittelukatselmointia edullisella ja yksinkertaisella laitteistolla. Paremman visualisoinnin avulla tuotteeseen liittyvistä asioista muodostuu kokonaisvaltaisempi ymmärrys entistä nopeammin. Tämän lisäksi voidaan toteuttaa erilaisia sovelluksia, jotka mahdollistavat suunnitteluun osallistumisen ilman CAD-ohjelman käyttöä. Tämä mahdollistaa esimerkiksi loppukäyttäjien osallistumisen suunnittelutyöhön, joka

tehostaa tiedonsiirtymistä ja lisää suunnittelijoiden tietämystä tuotteen todellisista vaatimuksista.

Lisätyn todellisuuden avulla pienet teknologiaa tuntevat yritykset voivat ottaa käyttöönsä virtuaaliympäristöjen ominaisuuksia, joista ovat tähän asti päässeet nauttimaan vain suuret yritykset. Tämä mahdollistaa tuotteeseen liittyvien asioiden testaamisen virtuaalimallilla, jolloin suunnittelukierroksia voidaan tehdä enemmän ja fyysisten prototyyppien määrää voidaan vähentää. Edullisen ja yksinkertaisen laitteiston ehdoton vahvuus on siinä, että visualisointiympäristö voidaan pystyttää lähes minne tahansa vain muutamassa tunnissa. Jos hyödynnetään esivalmisteltua tai valmista markerikenttää, pystytykseen kuluu aikaa vain joitain minutteja.

Näin ollen työssä kehitettyä visualisointiympäristöä voidaan soveltaa myös muihin tuotteen elinkaaren vaiheisiin, kuten markkinointiin, myyntitilanteisiin ja mainontaan. Messuilla ja muissa markkinointitilanteissa todellisessa koossa visualisoitu virtuaalimalli herättää varmasti mielenkiintoa. Tuotteeseen liittyen voidaan tehdä lisäksi lisättyä todellisuutta hyödyntävä ja yksinkertaisella käyttöliittymällä varustettu peli tai suunnittelu-sovellus. Myyntitilanteessa visualisointiympäristön avulla asiakas pääsee näkemään mitä hän on ostamassa ja samalla voidaan näyttää esimerkiksi modulaarisen tuotteen eri vaihtoehtoja.

Yhteenvetona voidaan sanoa, että lisätyn todellisuuden avulla voidaan suunnitella entistä laadukkaampia tuotteita, koska tuotteen suunnittelun aikana tehdyt päätökset voidaan perustaa aikaisempaa kokonaisvaltaisempaan ja laadukkaampaan tietoon tuotteen vaatimuksista. Suunnittelun lisäksi AR-teknologiaa voidaan hyödyntää myös muissa tuotteen elinkaaren vaiheissa.

5.5. Tulosten tarkastelu

Osittain samanlaisia tuloksia on saatu myös muissa tutkimuksissa. Dunston et al. (2002) mainitsivat sovelluksensa suurimmaksi hyödyksi mahdollisuuden tarkastella virtuaalimallia luonnollisesti ja nopeasti eri kulmista. Woohun ja Jun (2005) kehittivät sovelluksen, joka mahdollisti loppukäyttäjien mukaan ottamisen suunnitteluprosessiin. Uvan et al. (2010) ja Santosin et al. (2007) kehittämä sovellus tehosti erityisesti tiedonsiirtymistä. Klinker et al. (2002) toteuttivat sovelluksen todellisen kokoisen virtuaalimallin visualisoimiseksi autoteollisuuden tuotesuunnittelijoille.

Tässä työssä esitettiin uusi tapa hyödyntää lisättyä todellisuutta varten kehitettyä paikannusmenetelmää virtuaaliympäristöistä tuttuja ominaisuuksien toteuttamiseksi. Lisätyn todellisuuden teknologia mahdollistaa todellisen kokoisen virtuaalimallin visualisoimisen lähes minne tahansa ilman suuria vaatimuksia. Työssä esitetyt sovellukset ovat helposti kopioitavissa ja siirrettävissä myös tutkimusympäristön ulkopuolelle, koska ne on toteutettu poikkeuksellisesti kaupallisilla ohjelmilla, jolloin sovellusten toteutus ei vaadi ohjelmointitaitoa. Tämän ansiosta pienet teknologiaa tuntevat yritykset pääsevät hyödyntämään virtuaalisia prototyyppijä, jotka ovat korkeiden kustannusten takia olleet aikaisemmin vain suurten yritysten käytettävissä.

Saavutetut tulokset vastaavat työssä asetettuihin tavoitteisiin ja tuovat lisätietoa lisätyn todellisuuden hyödynnettävyydestä suunnittelukatselmoinneissa. Tulokset ovat myös tieteellisesti uusia ja työssä toteutetusta AR-katselmoinnista onkin tehty konferenssiartikkeli, jossa toteutusta vertaillaan suorituskykyisellä laitteistolla toteutettuun katselmointiin. Mäkirannan et al. (2011) kirjoittama artikkeli tullaan esittämään Scandinavian International Conference of Fluid Power -konferenssissa toukokuussa 2011.

5.6. Tulevaisuus

Lisätty todellisuus kehittyy nyt nopeammin kuin koskaan. Sovellusten siirtyessä entistä enemmän kuluttajamarkkinoille kehitys saattaa nopeutua vielä huomattavasti lisää. Tästä syystä on tärkeää luoda nopea katsaus alan tulevaisuuteen ja tärkeimpiin kehitysalueisiin, jotka mahdollistavat lisätyn todellisuuden entistä monipuolisemmat sovellusmahdollisuudet.

5.6.1. Edullisten paikannusmenetelmien kehitys

Paikannuksen tehokkuus ja tarkkuus ovat lisätyn todellisuuden tärkeimpiä asioita. Tästä syystä sen kehittämiseen panostetaan ja menetelmät kehittyvät varsin nopeasti. Viime aikoina kehitys on painottunut markkerittomaan paikannukseen, jossa hyödynnetään ympäristön piirteitä ja luonnollisia kontrastieroja. Tällainen menetelmä tarjoaa huimia mahdollisuuksia, ja laajentaa lisätyn todellisuuden hyödynnettävyyttä merkittävästi.

Menetelmään liittyy edelleen joitain haasteita, joista yksi on paikannuksen toimivuus nopeassa liikkeessä. Tällöin kuva saattaa sumentua, jonka seurauksena paikkatieto katoaa. Tätä voidaan estää esimerkiksi nollamarkkerilla, jonka perusteella paikkatieto saadaan uudelleen selville ja markkeritonta paikannusta voidaan jatkaa. Toinen parhaillaan tutkittava menetelmä on usean edullisen kameran käyttäminen. Tällaisen järjestelmän avulla voitaisiin toteuttaa erittäin tarkka paikannus edullisesti. Menetelmän potentiaalia selvitetään ManuVAR-projektissa.

Paikannusmenetelmien tarkoitus on useimmiten paikantaa käyttäjän kehoa ja liikkeitä. Vuoden 2010 lopulla Microsoft julkaisi xbox-pelikonsolille tarkoitetun kinect-lisälaitteen, jonka avulla käyttäjä voidaan paikantaa tarkasti. Paikannus ei vaadi minkäänlaisia markkereita tai ohjaimia, vaan laitteisto paikantaa kehon konenäköön perustuvilla menetelmillä. Tällaiset kuluttajamarkkinoille kehitetyt laitteistot ovat usein erittäin merkittävässä asemassa teknologioiden hyödyntämisen kehityksessä ja tarjoavat uusia mahdollisuuksia tiedemaailmalle sekä teollisuudelle. Jatkokehitystä voitaisiin tehdä esimerkiksi paikannusalueen kasvattamiseksi.

Luonnollisemman käyttöliittymän toteuttamiseen riittäisi pelkästään käyttäjän sormien ja käsien paikantaminen. Useimmissa lisätyn todellisuuden sovelluksissa todellinen ympäristö tuodaan sovellukseen videokuvan avulla, jolloin sormien tunnistaminen on mahdollista suoraan videokuvasta. Tätä menetelmään on sovellettu

muutamissa sovelluksissa, ja se tarjoaakin täysin uudenlaisia mahdollisuuksia ihmisen ja koneen vuorovaikutuksen kehittämiseksi.

5.6.2. Kannettavat laitteet

Kannettavien laitteiden kehitys on suorassa yhteydessä lisätyn todellisuuden sovellettavuuteen ja käytön leviämiseen. Langattomat laitteet mahdollistavat yksinkertaisen ja helpon käyttöliittymän, joka madaltaa kynnystä AR-sovellusten käyttöönottoon, ja lisää näin teknologian leviämistä. Suurin potentiaali kohdistuu älykkäisiin matkapuhelimiin ja uuden sukupolven tablet-tietokoneisiin.

Matkapuhelimien ylivertaisuus tulevaisuuden kuluttajasovelluksissa tulee suurella todennäköisyydellä pohjautumaan siihen, että laitetta pidetään jatkuvasti mukana ja siinä on kaikki mitä lisätyn todellisuuden sovellukseen tarvitaan. Näytön pieni koko ja erilaisten käyttöjärjestelmien suuri määrä on kuitenkin toistaiseksi hidastanut lisätyn todellisuuden laajempaa käyttöönottoa. Tulevaisuudessa älykkäät matkapuhelimet tulevat olemaan merkittävässä roolissa kuluttajille tarkoitettujen sovellusten käytössä. Kuluttajasovellusten avulla myös matkapuhelimelle kehitettyjen teollisuussovellusten määrä tulee todennäköisesti lisääntymään.

Vuonna 2010 tulivat markkinoille ensimmäiset kevyet ja pienikokoiset kosketusnäytöllä varustetut tablet-tietokoneet. Vuoden 2011 alussa erilaisia laitteita oli tarjolla jo kymmenittäin. Laitteet sijoittuvat ominaisuuksiltaan matkapuhelinten ja kannettavien tietokoneiden väliin, joka tekee niistä lähes optimaalisia lisätyn todellisuuden tarpeisiin. Keveys ja kompakti koko mahdollistavat entistä luonnollisemmat ja helppokäyttöisemmät käyttöliittymät. Laskentateho rajoittaa toistaiseksi laitteen käyttöä monimutkaisten AR-sovellusten kohdalla. Tulevaisuuden kehittyneemmät versiot mahdollistavat lisätyn todellisuuden uudenlaisen ja entistä monipuolisemman hyödynnettävyyden.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä selvitettiin lisätyn todellisuuden tarjoamia mahdollisuuksia suunnittelukatselmoinnin tukemiseksi. Konstruktiiivisessa tapaustutkimuksessa kehitettiin edullisella laitteistolla kaksi lisättyä todellisuutta hyödyntävää sovellusta, joista kerättiin käyttäjäkokemuksia kahdessa testikatselmoinnissa. Tapaustutkimuksessa todellisen kokoinen virtuaalimalli visualisoitiin osaksi suunnittelukatselmointia edullisella ja yksinkertaisella laitteistolla. Toinen sovellus oli suunnittelua tukeva työkalu, joka mahdollisti yksinkertaisen käyttöliittymän avulla osaamistaustaltaan erilaisten henkilöiden osallistumisen suunnitteluun. Tapaustutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että lisätyn todellisuuden avulla voidaan parantaa visualisointia ja luoda luonnollisemman ja todellisemman tuntuinen vuorovaikutus suunniteltavan tuotteen ja suunnittelijoiden välille.

Tulosten mukaan todellisen kokoinen virtuaalimalli voidaan visualisoida nopeasti lähes minne tahansa. Testikäyttäjien mielestä todellisessa koossa visualisoitu virtuaalimalli helpottaa kokonaisuuden hahmottamista, joka mahdollistaa vaadittavan ymmärryksen saavuttamisen entistä nopeammin. Edullisen laitteiston kustannukset ovat vain kymmenesosan vertailulaitteiston kustannuksista. Kalliimmalla laitteistolla virtuaalimalli pysyi vakaammin paikallaan, mutta edullinen laitteisto on huomattavasti helpommin siirrettävissä ja tarjoaa riittävän hyvän paikannustarkkuuden moniin sovelluksiin. Suunnittelua tukeva työkalu tarjosi testikäyttäjien mielestä uudenlaisen ja helpon tavan ryhmätyön tekemiseen. Lisäksi yksinkertainen käyttöliittymä mahdollisti suunnitteluun osallistumisen ilman CAD-ohjelman käyttötaitoa.

Työssä esitetyt sovellukset on helposti kopioitavissa ja siirrettävissä myös tutkimusympäristön ulkopuolelle, koska ne ovat toteutettu poikkeuksellisesti kaupallisilla ohjelmilla ilman vaatimusta ohjelmointiosaamisesta. Tämän ansiosta pienet teknologiaa tuntevat yritykset voivat ottaa käyttöönsä virtuaaliympäristöjen ominaisuuksia, jotka ovat korkeiden kustannusten takia olleet perinteisesti vain suurten yritysten ulottuvilla. Tämä mahdollistaa tuotteeseen liittyvien asioiden testaamisen virtuaalimallilla entistä useammin, jolloin suunnittelukierroksia voidaan tehdä enemmän ja tuotteen kokonaislaatu kasvaa.

Suunnittelun lisäksi työssä käytettyä laitteistoa voidaan soveltaa myös muihin tuotteen elinkaaren vaiheisiin. Edullinen ja yksinkertainen laitteisto mahdollistaa sen käyttämisen muun muassa markkinoinnin ja myynnin tukena. Esimerkiksi messuilla todellisessa koossa visualisoitu virtuaalimalli herättää varmasti mielenkiintoa. Myyntitilanteessa asiakkaalle voidaan visualisoida, mitä hän on ostamassa ja esitellä esimerkiksi modulaarisen tuotteen eri vaihtoehtoja.

Yritysten pitäisi hyödyntää rohkeasti lisätyn todellisuuden tarjoamia mahdollisuuksia. Saattaa kuitenkin olla, että yritykset näkevät uuden teknologian käyttöönoton liian riskialttiina. Näin ollen markkinoilla voisi olla tilausta yritykselle, joka toteuttaisi lisättyä todellisuutta hyödyntäviä visualisointisovelluksia alihankintana muille yrityksille. Tällöin yritykset voisivat tutustua ilman riskiä lisätyn todellisuuden tarjoamiin mahdollisuuksiin.

Lisätty todellisuus on monipuolinen teknologia, joka kehittyy juuri nyt nopeasti. Teknologian sovellusmahdollisuudet laajenevat jatkuvasti ja jatkokehityskohteita tulee muun muassa uusien laitteiden myötä koko ajan lisää. Tässä työssä esiteltiin uudenlainen lisättyä todellisuutta hyödyntävä katselmointi teknisestä näkökulmasta. Jatkokehitystä voitaisiin tehdä entistä paremman paikannuksen toteuttamiseksi markkerikenttää laajentamalla ja markkeritonta paikannusta hyödyntämällä. Lisäksi voitaisiin tehdä jatkotutkimusta edullisen laitteiston hyödyntämismahdollisuuksista muihin tuotteen elinkaaren vaiheisiin liittyen. Työssä saavutettiin asetetut tavoitteet ja työtä voidaan pitää onnistuneena. Lisättyä todellisuutta voidaan hyödyntää suunnittelukatselmoinneissa aikaisempaa edullisemmin kokonaisvaltaisemman ymmärryksen saavuttamiseksi.

LÄHTEET

3DVIA. 3DVIA-tuoteryhmän internetsivut [WWW]. Dassault Systèmes. 2011 [viitattu 7.1.2011]. Saatavissa: <http://www.3dvia.com/about/>

ALVAR. Ohjelmistokirjaston internetsivut [WWW]. VTT. 2010 [viitattu 14.9.2010]. Saatavissa: <http://virtual.vtt.fi/virtual/proj2/multimedia/index.html>

ARToolKit. Ohjelmistokirjaston internetsivut [WWW]. 2010 [viitattu 30.9.2010]. Saatavissa: <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>

Azuma, R. 1997. A Survey of Augmented Reality. *Teleoperators and Virtual Environments* 6, 4, pp. 355-385.

Azuma, R., Bailiot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S. & MacIntyre, B. 2001. Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Application* 21, 6, pp. 34–37.

Bernatchez, M. Resolution analysis for HMD helmets [WWW]. 2007 [viitattu 28.9.2010]. Saatavissa: http://vresources.org/HMD_rezanalysis.html

Bimber, O. & Raskar, R. 2005. *Spatial Augmented Reality Merging Real and Virtual Worlds*. A.K. Peters. 392 p.

Brereton, M. & McGarry, B. 2000. An Observational Study of How Objects Support Engineering Design Thinking and Communication: Implications for the Design of Tangible Media. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, 1-6 April, 2000. New York, NY, ACM Press. pp. 217-224.

Brewster, P. 2004. *Advanced Interfaces for Virtual Environments*. NASA, Langley Research Center. 7p.

Brooks, F. P. Jr. 1999. What's Real About Virtual Reality? *IEEE Computer Graphics and Applications* 16, 6, pp. 16-27.

Caudell, T.P. & Mizell D.W. 1992. Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences*, 1992. pp. 659-669.

Dunston, P., Wang, X., Billingshurst, M. & Hampson, B. 2002. Mixed reality benefits for design perception. *Proceedings of 19th International Symposium on Automation and*

Robotics Construction (ISARC 2002), Gaithersburg, Maryland, 23–25 September, 2002, NIST, pp. 191–196.

ESC. Maapallon simulaatiokeskuksen (The Earth Simulator Center) CAVE-laitteiston periaatekuva [WWW]. 2007 [viitattu 12.1.2011]. Saatavissa: <http://www.jamstec.go.jp/esc/research/Perception/vr.en.html>

FP7. Euroopan komission seitsemänneen tutkimusohjelman projektit [WWW]. 2010 [viitattu 13.10.2010]. Saatavissa: http://cordis.europa.eu/fp7/projects_en.html

Fua, P. & Lepetit, V. Vision Based 3D Tracking and Pose Estimation for Mixed Reality. Chapter I. In: Haller, M., Billinghurst, M. & Thomas B. H. (eds.). Emerging Technologies of Augmented Reality: Interfaces and Design. IGI Global.

Galaxy Tab. Tuotteen internetsivut [WWW]. 2011 [viitattu 7.1.2011]. Saatavissa: http://www.samsung.com/fi/consumer/mobile/mobilephones/mobilephones/GT-P1000MSANEE/index.idx?pagetype=prd_detail&tab=specification

Gartner. Hype Cycle for Emerging Technologies 2010 [WWW]. 2010 [viitattu 21.9.2010]. Saatavissa: <http://www.gartner.com>

Gartner. Gartner's hype cycle special report for 2010 [PDF]. 2010 [viitattu 23.9.2010]. Saatavissa: http://www.gartner.com/resources/205800/205839/gartners_hype_cycle_special__205839.pdf

GIM. Älykkäiden koneiden huippuyksikkö GIM [WWW]. 2011 [viitattu 11.1.2011]. Saatavissa: <http://www.tut.fi/index.cfm?MainSel=3&Sel=15759&Show=24516&Siteid=0>

Haller, M., Billinghurst, M., Thomas, B. (editors). 2007. Emerging Technologies of Augmented Reality: Interfaces and Design. IGI Global. 399 p.

HP Slate 500. Tuotteen internetsivut [WWW]. 2011 [viitattu 7.1.2011]. Saatavissa: https://h30406.www3.hp.com/campaigns/2010/promo/HPSL/images/Datasheet-Slate-500-Datasheet.pdf?jumpid=re_r602_slate_body_psg_oct10_datasheet

Inition. VR-laitteita myyvän yrityksen internetsivut [WWW]. 2010 [viitattu 26.10.2010]. Saatavissa: <http://www.inition.co.uk/>

Ipad. Tuotteen internetsivut [WWW]. 2011 [viitattu 7.1.2011]. Saatavissa: <http://www.apple.com/fi/ipad/specs/>

Kato,H., Billingham,M., Poupyrev,I., Imamoto,K., & Tachibana,K. 2000. Virtual object manipulation on a table-top AR environment. In Proceedings of the International Symposium on Augmented Reality. pp. 111-119.

Kaufmann, H. 2004. Geometry education with augmented reality. Dissertation. Wien. Vienna University of Technology. 169 p.

Klinker, G., Dutoit, A.H., Bauer, M., Bayer, J., Novak, V. & Matzke, D. 2002. Fata Morgana – A Presentation System for Product Design. Proceedings of ISMAR '02, pp. 76-85.

Krassi, B., Strauchmann, M., Kiviranta, S., Leino, S.-P., Viitaniemi, J., Reyes-Lecuona, A. & Sääski, J. 2010. Virtual Model for Supporting Communication of Manual Work Information Throughout System Lifecycle. Fraunhofer Institute for Factory Operation and Automation (IFF) days, Magdeburg, Germany, June 15-17, 2010.

Lee, B. & Chun, J. 2009. Manipulation of virtual objects in marker-less AR system by fingertip tracking and hand gesture recognition. In Proceedings of the 2nd international Conference on interaction Sciences: information Technology, Culture and Human (ICIS '09), Seoul, Korea, November 24 - 26, 2009. New York, NY, ACM Press. pp. 1110-1115.

Leino, S.-P., Kiviranta, S., Rantanen, P., Heikkilä, J., Martikainen, T., Vehviläinen, M., Mäkiranta, A., Nuutinen, P., Hokkanen, I. & Multanen, P. 2010. Collaboration between Design and Production by exploiting VR/AR and PLM - Case Metso Minerals. Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE2010), Miami, Florida, USA, 17-20 July, 2010. CRC Press.

Letessier, J. & Bérard, F. 2004. Visual tracking of bare fingers for interactive surfaces. Proceedings of the 17th annual ACM symposium on User interface software and technology, Santa Fe, NM, USA, October 24-27, 2004.

ManuVAR. Projektin internetsivut [WWW]. 2009 [viitattu 16.9.2010]. Saatavissa: <http://www.manuvar.eu/>

MASI-ohjelman uutislehti 1/2009 [PDF]. Tekes. 2009 [viitattu 27.8.2010]. Saatavissa: http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/MASI/fi/Dokumenttitarasto/Viestinta_ja_aktivointi/Julkaisut/MalliaMASIsta_1_09_aukeamat_valmis_web.pdf

Mercedes-Benz. Kuva yrityksen CAVE-laitteistosta. [JPG]. 2006 [viitattu 12.1.2011]. Saatavissa:

http://www.emercedesbenz.com/Images/Apr06/18DesignOfTheMercedesSClass/Designers_are_a-IMG_523.jpg

Metaio. Demovideo Metaion Touch2print-sovelluksesta [WWW]. 2010 [viitattu 19.10.2010]. Saatavissa: <http://www.youtube.com/metaioar#p/u/87/fyfmWi1tcas>

Metaio. Yrityksen internetsivut [WWW]. 2010 [viitattu 15.12.2010]. Saatavissa: <http://www.metaio.com/>

Milgram, P. & Kishino, F. 1994. A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. IEICE Transactions on Information Systems 77, 12, pp. 1321-1329.

Mäkiranta A., Nuutinen P., Multanen P., Hyvönen M., Leino S.-P., Kiviranta S. & Vehviläinen, M. 2011 Enhanced Mobile Machine Assembly and Maintainability Evaluation Using Virtual and Augmented Reality. The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power, Tampere, Finland, May 18-20, 2011. (Julkaistaan toukokuussa 2011)

Optitrack. Optitrack-paikannuslaitteistoa esittelevä internetsivu [WWW]. 2010 [viitattu 15.12.2010]. Saatavissa: <http://www.naturalpoint.com/optitrack/products/flex-v100r2/>

Pentenrieder, K., Bade, C., Doil, F. & Meier, P. 2007. Augmented Reality-based factory planning - an application tailored to industrial needs. Proceedings of the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, November 13-16, 2007. pp.1-9.

Poh, Y.L., Nee, Andrew Y.C., Youcef-Toumi, K. & Ong, S. K. 2005. Facilitating Mechanical Design with Augmented Reality. Singapore-MIT Alliance Symposium, Singapore.

Regenbrecht, H. 2007. Chapter XIV: Industrial Augmented Reality Applications. In: Haller, M., Billinghurst, M. & Thomas B. H. (eds.). Emerging Technologies of Augmented Reality: Interfaces and Design. IGI Global.

Reitmaa, I., Vanhala, J., Kauttu, A. & Antila, M. 1996. Virtuaaliympäristöt - kuvan sisälle vievät tekniikat. 2.painos. Helsinki, Tekes. 171 s.

Salonen, T., Sääski, J., Woodward, C., Hakkarainen, M., Korkalo, O. & Rainio, K. 2009. Augmented Assembly - Ohjaava kokoonpano. Espoo, VTT Working Papers 138. 32 s. + liitt. 36 s.

Santos, P., Stork, A., Gierlinger, T., Pagani, A., Paloc, C., Barandarian, I., Conti, G., Amicis, R.D., Witzel, M., Machui, O., Jiménez, J., Araujo, B., Jorge, J. & Bodammer, G. 2007 Improve: An innovative application for collaborative mobile mixed reality design review. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing* 1, 2, pp. 115–126.

Sutherland, I. E. 1965. The ultimate display. *Proceedings of the International Federation of Information Processing Congress*. pp. 506-508.

Total Immersion. Yrityksen internetsivut [WWW]. 2010 [viitattu 21.12.2010]. Saatavissa: <http://www.t-immersion.com/>

Tekes. Valmet Automotiven projektikuvaus [WWW]. 2010 [viitattu 13.10.2010]. Saatavissa: http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/Digitaalinen_tuoteprosessi/fi/system/projekti.html?id=9879744&nav=Projekti

Tekes. Moventaksen projektikuvaus [WWW]. 2010 [viitattu 13.10.2010]. Saatavissa: http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/Digitaalinen_tuoteprosessi/fi/system/projekti.html?id=9488565&nav=Projekti

Ulrich, K.T. & Eppinger, S.D. 2008. *Product Design and Development*. Fourth Edition. McGraw-Hill. 368 p.

Uva, A.E., Cristiano, S., Fiorentino, M. & Monno, G. 2010. Distributed design review using tangible augmented technical drawings. *Computer-Aided Design* 42, 5, pp. 364-372.

Verkkokauppa. Verkkokauppa.comin internetsivut [WWW]. 2010 [viitattu 20.10.2010]. Saatavissa: <http://www.verkkokauppa.com/>

Virtools. Virtools-ohjelman internetsivut [WWW]. 2010 [viitattu 16.9.2010]. Saatavissa: <http://www.3ds.com/products/3dvia/3dvia-virtools/>

Vuzix. HMD-laseja esittelevä internetsivu [WWW]. 2010 [viitattu 28.9.2010]. Saatavissa: <http://www.vuzix.com/consumer/index.html>

Wagner D, Schmalstieg D. 2007. ARToolKitPlus for pose tracking on mobile devices. *Proceedings of 12th computer vision winter workshop (CVWW07)*. Citeseer. pp. 139-146.

WeTab. Tuotteen internetsivut [WWW]. 2011 [viitattu 7.1.2011]. Saatavissa: <http://wetab.mobi/en/product/>

Woohun, L., Jun, P. 2005. Augmented Foam: A Tangible Augmented Reality for Product Design. Proceedings of the 4th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality. pp. 106-109.

LIITE 1: HAASTATTELULOMAKE

Haastattelujen tavoitteena on selvittää käyttäjien kokemuksia diplomityössä kehitetystä AR-sovelluksesta. Haastateltavista ei tallenneta yksilöllisiä tietoja. Käyttäjiltä toivotaan saatavan mahdollisimman kattavat vastaukset seuraaviin kysymyksiin:

Kysymys 1: Mitä katselmoinneista jäi päällimmäisenä mieleen?

Kysymys 2: Mitä hyvää ja/tai huonoa AR-katselmoinnissa oli?

Kysymys 3: Arvioi AR-katselmointia seuraavien ominaisuuksien osalta?

- a) visuaalisuus ja havainnollisuus
- b) objektien liikuteltavuus
- c) helppokäyttöisyys
- d) osallistujien aktiivisuus

Kysymys 4: Minkälaiset kokemukset sinulle jäi HMD-lasien käytöstä? Entä miniläppärin käytöstä?

Kysymys 5: Arvioi AR-katselmoinnin hyödyllisyyttä?

Kysymys 6: Miten AR-katselmoinnin tulisi muuttua, jotta se olisi entistä hyödyllisempi?

Kysymys 7: Millä muulla tavalla lisättyä todellisuutta voitaisiin hyödyntää suunnittelukatselmoinneissa? Entä muilla alueilla?

Kysymys 8: Muita huomioita?